LA SUPERFLUIDEZ

LANDAU

La física que surgió del frío



NATIONAL GEOGRAPHIC

LEV LANDAU se erige como uno de los científicos que más contribuyeron al desarrollo de la física en el siglo XX. En el marco de la entonces juvenil mecánica cuántica, aplicó la nueva teoría a una gran variedad de problemas concretos para responder a las propiedades observadas en la materia. Sus trabajos siguen siendo de utilidad en numerosos campos de la física, pero las aportaciones más destacadas del genio soviético se refieren a las propiedades cuánticas de sistemas macroscópicos a muy bajas temperaturas, como la superconductividad y la superfluidez, estado de la materia este último en el que, debido a la completa ausencia de viscosidad, una sustancia como el helio líquido podría fluir ininterrumpidamente.

LA SUPERFLUIDEZ

LANDAU

La física que surgió del frío

NATIONAL GEOGRAPHIC

JESÚS NAVARRO FAUS es profesor de Investigación en el Instituto de Física Corpuscular de la Universitat de València-CSIC. Ha publicado numerosos libros de divulgación científica, entre los que se cuentan biografías de referencia en castellano de figuras como Erwin Schrödinger y Richard Feynman.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: Luz de la Mora

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Age Fotostock/Science Photo Library: 149bd; Archivo RBA: 30, 43ai, 43ad, 43b, 67, 73b, 103a, 147; Archivos KGB: 104; Bern Dibner Library of Science and Technology: 28, 62; Biblioteca del Congreso de Estados Unidos: 103b; IBM Research, Zúrich: 121; The MacTutor History of Mathematics archive: 151; Net-Fax.org: 73a, 149a; *Region Plus*: 131a, 149bi; Uspekhi Fizicheskikh Nauk: 133; www.visualphotos.com: 124; Zhabysh: 131b.

ISBN: 978-84-473-7780-0
Depósito legal: B-20898-2016

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - *Printed in Spain*

Sumario

Introducción

En 1929, cuando tenía veintiún años, Lev Davidovitch Landau decía a sus amigos que había nacido demasiado tarde, porque las mujeres más guapas ya estaban casadas y las teorías físicas más importantes ya habían sido descubiertas. Esta broma refleja dos aspectos opuestos de su personalidad. Por un lado, su enorme timidez y su inseguridad en el trato con las mujeres, y en general con los demás, lo que en gran medida se debía a su precocidad. Después de una infancia bastante solitaria, Landau ingresó en la universidad con solo catorce años, entre estudiantes mayores y más maduros que él. Un adolescente larguirucho y desgarbado tenía pocas posibilidades de atraer a sus compañeras de mayor edad. Pero, por otro lado, esta misma precocidad hacía que tuviera una enorme confianza en sí mismo en todo lo relacionado con la física, un terreno en el que se sentía superior a sus demás compañeros. Landau era consciente de sus dotes especiales para plantear y resolver problemas difíciles en cualquier campo de la física, para analizar con total precisión desde el aspecto científico las ideas e hipótesis que se le plantearan.

Las teorías físicas a las que hacía referencia eran, claro está, la relatividad y la mecánica cuántica. Fueron creadas para entender problemas que aparentemente no tenían consecuencias prácticas, como la invariancia de las leyes físicas o las propiedades de átomos y moléculas. Sin embargo, nuestro mundo actual no sería

el que es sin el desarrollo de estas teorías. Por poner solo algunos ejemplos, se ha estimado que en torno al 30% del producto interior bruto de Estados Unidos tiene su origen en aplicaciones de la mecánica cuántica, como ordenadores, teléfonos móviles, láseres, etcétera. Y sin la relatividad, los sistemas de posicionamiento global (GPS) no serían tan precisos.

La relatividad fue obra de una sola persona, Albert Einstein, quien elaboró la teoría restringida en 1905 y la teoría general en 1914. En cambio, la mecánica cuántica fue una empresa colectiva en la que intervinieron muchos científicos, incluido Einstein. Se inició en 1900 con la hipótesis de Planck y culminó en 1925-1926 con la versión matricial de Heisenberg, Jordan y Born, y la versión ondulatoria de Schrödinger. Son dos versiones equivalentes de la teoría rigurosa general que llamamos mecánica cuántica. Siendo estudiante en la Universidad de Leningrado, Landau quedó fascinado por la simplicidad y belleza de las teorías de Einstein. En cuanto a la mecánica cuántica, la aprendió al mismo tiempo que se desarrollaba, leyendo los artículos publicados por sus creadores, y aunque él mismo publicó, siendo aún estudiante, algunos artículos sobre diversos aspectos de la nueva teoría, Landau se encontró ante una teoría prácticamente elaborada y completa. No es pues de extrañar que pensara que, de haber empezado dos o tres años antes, habría podido ser él mismo uno de los creadores de la mecánica cuántica. Landau nunca se interesó en el debate sobre los fundamentos e interpretación de la mecánica cuántica, sino que se dedicó a aplicarla a una gran variedad de problemas concretos, para poder explicar las propiedades observadas de la materia. En muchos casos fue capaz de establecer un marco teórico general que abarca situaciones más amplias que el problema concreto que la motivó.

Se habla de física moderna, en contraposición a la física clásica, para referirse a la relatividad y la teoría cuántica. No hay que pensar por ello que la física clásica ha quedado obsoleta, pues basta y sobra para resolver problemas como la construcción de un rascacielos, la transmisión de ondas electromagnéticas o para explicar el vuelo de un avión. No hay que olvidar el aspecto acumulativo de la ciencia: cuando las hipótesis iniciales superan un am-

plio conjunto de pruebas observacionales, experimentales, lógicas, etcétera, se convierten en conocimientos permanentes o verdaderos, si se quiere utilizar esta arriesgada palabra. Son conocimientos válidos dentro de ciertos límites, y la física moderna ha mostrado de forma precisa los límites de la física clásica.

Dos de estos límites son fácilmente cuantificables por los valores de la velocidad de la luz y de la constante de Planck. Cuando las velocidades típicas de un fenómeno son comparables a la velocidad de la luz en el vacío (300 000 km/s), la física clásica es insuficiente, y es necesario el uso de la física relativista. De la misma manera, si las acciones características de un sistema (*acción* es el nombre que se da en física al producto de energía y tiempo) son comparables al valor de la constante de Planck ($6{,}6 \cdot 10^{-34}$ J · s), es necesario recurrir a la física cuántica. En toda lógica, podemos preguntarnos si estas modernas teorías tienen también sus limitaciones. En principio, nada impide que en un futuro más o menos próximo surjan nuevos fenómenos físicos o nuevos conceptos que requieran de una nueva teoría que acote el dominio de validez de la física moderna. De hecho, las que de manera bastante pomposa se llaman «teorías del todo» tienen precisamente esta ambición, integrar la mecánica cuántica y la gravitación, y unificar las cuatro interacciones fundamentales conocidas.

La física clásica deja también de ser válida cuando las temperaturas en juego son «suficientemente bajas». Pero en este caso no hay una constante universal con dimensiones de temperatura para establecer un límite cuantitativo, pues este depende de las características del sistema físico. De momento mantendremos la vaguedad del entrecomillado, que se irá precisando más adelante. Naturalmente, una temperatura muy próxima al cero absoluto será suficientemente baja. Pero hay sistemas como los metales, las estrellas llamadas enanas blancas o las estrellas de neutrones, en los que temperaturas suficientemente bajas pueden ser de decenas de miles o incluso millones de grados, es decir, altas o muy altas a nuestra escala. Digamos de pasada que muy a menudo se asocia la física cuántica exclusivamente con el mundo de los átomos, moléculas, núcleos atómicos..., es decir, con sistemas microscópicos cuyos tamaños se miden en nanómetros ($1 \text{ nm} = 10^{-9}$ m), o femtómetros

(1 fm = 10^{-15} m). Implícitamente, parece darse a entender que la física cuántica es irrelevante en sistemas macroscópicos, de escalas mayores, cosa que no es cierta. Aparte de que la propia estabilidad de la materia es un fenómeno cuántico, los metales y las estrellas son ejemplos de sistemas cuánticos a escala macroscópica.

Las contribuciones más importantes de Landau se refieren a las propiedades cuánticas de sistemas macroscópicos a muy bajas temperaturas. Recibió el premio Nobel de Física de 1962 «por sus teorías pioneras para la materia condensada, especialmente el helio líquido». El nombre de materia condensada se refiere a sistemas cuánticos con un gran número de constituyentes, que interaccionan entre sí con una intensidad que dista mucho de ser despreciable. Los sólidos y líquidos de la vida cotidiana son ejemplos específicos de materia condensada.

Pocos físicos teóricos del siglo XX merecen como Landau el calificativo de *físico global* por la diversidad de campos en los que ha hecho aportaciones significativas. Estas siguen teniendo interés actual, como queda de manifiesto con epónimos como «diamagnetismo de Landau», «niveles de Landau», «espectro de Landau», «teoría de Landau sobre transiciones de fase», «teoría de Landau sobre la superfluidez», «teoría de Landau sobre los líquidos de Fermi», «parámetros de Landau» o «teoría de Ginzburg-Landau sobre la superconductividad», que aparecen en artículos científicos y libros de texto. Sus trabajos pioneros no solo siguen nutriendo los estudios actuales sobre la materia condensada, sino también en física nuclear, dinámica de fluidos, astrofísica, física de plasmas, rayos cósmicos o partículas elementales.

Además de sus aportaciones a la física, Landau dejó dos legados importantes. En primer lugar, los diez volúmenes de su famoso *Curso de Física Teórica*, escritos con su discípulo, colaborador y amigo Evgeny Lifshitz. Este curso ha sido traducido a una veintena de lenguas y aún se sigue editando. Para muchos estudiantes de física, es la primera ocasión de conocer el nombre de Landau. Su otro gran legado fue la formación de una importante escuela soviética de física teórica. Tanto el *Curso de Física Teórica* como la escuela de Landau reflejan su visión tan peculiar de la física, concebida como un todo, sin compartimentos estancos.

La escuela de Landau no fue, claro está, la única que existió en la URSS, ni siquiera en física teórica. Tras la Segunda Guerra Mundial, la URSS se convirtió en una superpotencia, especialmente en el aspecto militar, capaz de producir armamento nuclear, misiles intercontinentales o lanzar satélites artificiales. Es evidente que esto solo pudo conseguirse gracias a la existencia de un nutrido grupo de científicos e ingenieros de alto nivel. No es que no hubiese grandes científicos durante el zarismo, pero se trataba de casos aislados. Durante los primeros años del poder soviético se creó una potente red de instituciones formativas, científicas y técnicas, que propició la aparición de muchos científicos e ingenieros con una excelente y sólida formación. Todo ello permitió el rápido desarrollo industrial soviético en muchos sectores. Pero al mismo tiempo que se impulsaba el desarrollo de la ciencia en general, también se intentó imponer en ella una visión acorde con la doctrina oficial del materialismo dialéctico. La física moderna corrió mejor suerte que la genética, que fue oficialmente prohibida en 1948 como «pseudociencia burguesa», en favor de las ideas vernalistas de Lyssenko. La física moderna no solo establece límites de aplicabilidad a la física clásica, sino que también representa una ruptura radical de conceptos e ideas que parecían bien establecidos, como el espacio, el tiempo, la causalidad, la realidad, etcétera. Los creadores de la mecánica cuántica dedicaron mucho tiempo a debatir sus aspectos paradójicos, como la dualidad onda-corpúsculo, el principio de indeterminación, la causalidad, o sus consecuencias filosóficas. Este debate sobre la interpretación de la mecánica cuántica sigue vivo en la actualidad, alimentado por experimentos impensables hace unas décadas. Pero en la URSS de las décadas de 1930 y 1940 el debate se hacía en otros términos, y las diversas interpretaciones de la física moderna se consideraban como un típico producto del idealismo burgués, que era necesario combatir. En el ambiente político de la URSS, sobre todo durante esos años, la acusación de idealismo podía tener consecuencias muy peligrosas según quién la hiciera. Landau no se salvó de este tipo de acusaciones, que figuran en su expediente policial.

En este libro se combinan aspectos biográficos, históricos y divulgativos para presentar el legado científico de Landau. El hilo

conductor viene dado por sus aportaciones a la comprensión de los líquidos cuánticos, es decir, de aquellos sistemas macroscópicos que manifiestan un comportamiento cuántico a temperaturas suficientemente bajas. El ejemplo paradigmático de líquido cuántico es el helio líquido, la única sustancia que permanece en estado líquido incluso a una temperatura de cero absoluto. Manifiesta también el fenómeno de la superfluidez, a cuya explicación contribuyó Landau de modo esencial. También veremos con cierto detalle su aportación, junto con Ginzburg, a la comprensión de la superconductividad, y su teoría de los líquidos de Fermi. Para situar en su adecuado contexto la vida y los trabajos de nuestro protagonista, se harán algunas referencias a las instituciones científicas de la URSS y se darán algunos ejemplos para mostrar las tensiones existentes entre la filosofía oficial y la física moderna.

1908 El 22 de enero nace en Bakú (actual Azerbaiján) Lev Davidovitch Landau.

1922 A los catorce años empieza sus estudios universitarios en las facultades de Física y Matemáticas y en la de Química de la Universidad de Bakú.

1924 Se traslada a la Facultad de Física de la Universidad de Leningrado.

1927 Acaba sus estudios poco antes de cumplir diecinueve años. Publica su primer artículo de cierta importancia, «El problema del amortiguamiento en mecánica cuántica».

1929 Inicia un viaje de estudios durante año y medio con visitas a los centros europeos más importantes y los científicos más relevantes de la época.

1930 Publica un artículo en el que expone su teoría sobre lo que se denominó *diamagnetismo de Landau*, cuyos resultados fueron presentados en el VI Congreso Solvay por Pauli.

1932 Es nombrado director del grupo de Física Teórica del Instituto Físico-Técnico de Ucrania, en Járkov.

1937 Se traslada a Moscú como director del Departamento de Física Teórica del Instituto de Problemas Físicos.

1938 Es encarcelado durante un año, acusado de actividades antisoviéticas.

1940 Se casa con Concordia Terentievna Drobantseva.

1941 Publica el artículo «La teoría de la superfluidez del Helio II», en el que, para explicar el concepto de superfluidez, considera el helio líquido como una entidad cuántica.

1941-1945 Durante la Segunda Guerra Mundial, se dedica a la investigación relacionada con explosivos.

1946 Nace Igor, su único hijo. Es nombrado miembro de la Academia de Ciencias de la URSS.

1946-1953 Participa en el programa nuclear soviético, que abandona a la muerte de Stalin.

1950 El trabajo conjunto de Landau y Vitali Ginzburg sobre las transiciones de fase entre las fases normal y superconductora de metales desemboca en la teoría de Ginzburg-Landau, que explica el fenómeno de la superconductividad.

1956 Desarrolla la teoría de los líquidos normales de Fermi.

1962 Sufre un grave accidente de coche del que nunca se recuperó totalmente. Recibe el premio Nobel de Física durante su estancia en el hospital.

1968 El 1 de abril muere en Moscú por las secuelas del accidente.

CAPÍTULO 1

La formación de un físico soviético

Los primeros veinte años de la vida de Landau estuvieron marcados por dos revoluciones: en su país, la Revolución soviética, que condicionó el panorama político internacional en el siglo XX; en física, la revolución cuántica, que supuso un profundo cambio conceptual y metodológico, y ha condicionado el desarrollo económico de la sociedad. Es necesario hablar de ambas revoluciones para situar en su contexto histórico y científico las aportaciones de Landau.

A principios del siglo XX, Bakú, la capital de la actual república de Azerbaiján, era el principal centro petrolífero del Imperio ruso y uno de los más importantes del mundo. En Bakú se había instalado la Caspian-Black Sea Joint Stock Company, una sociedad anónima internacional creada en 1883 para extraer, refinar y transportar el petróleo a todo el mundo. En su dirección técnica trabajaba el ingeniero David Levovich Landau. Próximo a cumplir cuarenta años, aún seguía soltero, lo que preocupaba a sus padres. Se les ocurrió un plan casamentero y le sugirieron que se tomara unas vacaciones y acompañara a su prima Ana en un breve viaje a Suiza con la intención de que surgiera la chispa entre ellos. La prima tenía previsto ir con una amiga, Lyubov Veniaminovna Harkavi, quien había pasado un año estudiando en Zúrich.

La época no era fácil para que las mujeres accedieran a estudios universitarios y, como ilustra el caso de Marie Curie, hacía falta un carácter fuerte y una gran determinación para lograrlo. Lyubov era de una familia muy modesta, y hasta el final de sus estudios tuvo que trabajar para costear su propia manutención. Pensó que en Suiza le sería más sencillo ingresar en la universidad, pero su estancia en Zúrich no le satisfizo y decidió regresar a San Petersburgo. Tuvo que batallar para conseguir el permiso especial exigido a los judíos rusos para residir en la capital del Imperio.

Primero se hizo comadrona, y luego ingresó en la primera escuela femenina de Medicina, donde se graduó en 1904.

La treta de los padres de David funcionó, pero no como habían imaginado: el hijo prefirió a la amiga de la prima y no a esta. En 1905, Lyubov y David se casaron y se fueron a vivir a Bakú, en un céntrico y espacioso apartamento. El 8 de agosto de 1906 nació Sofía, y el 22 de enero de 1908, nuestro protagonista, Lev, familiarmente llamado con el diminutivo Lyova. Tal como era el uso entre las familias acomodadas, los hijos recibieron sus primeras clases en casa con un profesor particular, bajo la supervisión de los padres. Los niños estudiaron francés, alemán y piano. Los idiomas se le daban bien a Landau, pero el piano era un suplicio, porque carecía de oído musical. Más tarde, cuando acudió a la escuela, descubrió su interés por las ciencias, sobre todo por las matemáticas, materia en la que mostró una especial capacidad para resolver problemas de manera original.

La infancia y la adolescencia de Landau coincidieron con una época de especial efervescencia social y política, con la Primera Guerra Mundial, la Revolución soviética y tres años de guerra civil. Los últimos enfrentamientos promovieron el cierre de los centros de enseñanza durante casi un año. Al principio de su encierro forzoso en casa, Landau se dejó llevar por la apatía y el pesimismo, llegando incluso a considerar el suicidio, pero superó la crisis gracias a dos cosas. Por un lado, sus padres le hicieron ver que si renunciaba al estudio tan pronto comprometería su futuro, y este argumento hizo mella en su amor propio. Por otro, la lectura de la novela de Stendhal *El rojo y el negro*: de su protagonista, Julien Sorel, decidió imitar su lucha contra una sociedad hostil, desarrollando una gran fuerza de voluntad y siendo artífice de su propio destino. De alguna manera, decidió afrontar la vida con una actitud lo más racional posible, y parece que lo consiguió. A lo largo de su existencia, siempre se sorprendió de que a él no le afectaran los problemas y conflictos cotidianos de la misma manera que a las demás personas.

A partir de ese momento, se dedicó intensamente a la historia, a la poesía y, sobre todo, a las matemáticas. Se entusiasmó por la Revolución francesa y se formó una visión romántica e idealizada

de la revolución que tenía lugar en su país. Memorizó muchas poesías, que recitaba en voz baja o declamaba para su familia y amigos, y también aprendió por su cuenta cálculo diferencial e integral. Pese a ello, en la edad adulta siempre diría que no se consideraba un niño prodigio. En 1961, durante un coloquio con estudiantes de física en Moscú, explicaba que en la escuela sus notas eran más bien mediocres en muchas asignaturas excepto en matemáticas.

> «Todos los físicos teóricos llegan a la ciencia a través de las matemáticas, y yo no fui una excepción.»
>
> — Lev Davidovitch Landau.

En abril de 1920, el Ejército rojo estableció el poder soviético en los países del Cáucaso, creándose la República Socialista Soviética de Azerbaiján. Landau tenía problemas en el instituto, por su carácter rebelde y obstinado y porque ya sabía más de lo que le podían enseñar en él. Sus padres creían que aún era demasiado joven para ingresar en la universidad, así que decidieron inscribirlo en un instituto técnico de economía. Pero aquella no fue la mejor opción para sus inquietudes. En 1922 ingresó en la Universidad de Bakú, matriculándose a la vez en la Facultad de Matemáticas y Física y en la de Química. Tenía solo catorce años, y no había completado formalmente los estudios secundarios, pero nada de esto constituía un obstáculo. En aquellos años cualquiera podía inscribirse en los cursos y niveles que considerara oportunos, solo bastaba justificar el aprovechamiento y superar los exámenes de las asignaturas. Como es de suponer, muchos de los inscritos sin estudios previos encontraron dificultades enormes para seguir los cursos. No fue el caso de Landau, quien había adquirido con creces los conocimientos necesarios. Llamó enseguida la atención de sus profesores porque era capaz de resolver los problemas planteados con gran originalidad y brillantez. En el segundo curso abandonó la química y decidió dedicarse solo a las matemáticas y la física. Pero ese mismo año la facultad se transformó en un centro de formación de profesores, debido al enorme impulso que se daba en el país a favorecer la instrucción general. Como Bakú dejó de

ser el lugar más adecuado para proseguir sus estudios, decidió continuarlos en Leningrado. La capital del Imperio ruso, San Petersburgo, había cambiado su nombre en 1914 por el de Petrogrado, y a la muerte de Lenin en 1924, se le dio el nuevo nombre de Leningrado en su honor. Su universidad y sus instituciones hacían de ella el principal centro científico de la URSS, y era la mejor opción para Landau.

LA REVOLUCIÓN SOVIÉTICA

El Imperio ruso era una autocracia en la que el zar tenía poderes absolutos e ilimitados. A pesar de los intentos de modernización, Rusia era una sociedad atrasada, en la que los campesinos, la mayoría de la población, vivían en un régimen feudal hasta que se abolió la servidumbre en 1861. A lo largo del siglo XIX hubo un creciente malestar general —económico, social y político— que se traducía en revueltas, represión y atentados. No deja de ser paradójico que en la Rusia de finales del siglo, muchos conservadores y monárquicos propugnaran reformas, y que los sectores moderados defendieran posturas radicales. El clima de tensión se agravó en 1905, durante el transcurso de la guerra contra Japón, cuando una manifestación popular en la lejana Siberia acabó en una masacre a manos del ejército. Las reformas se hicieron inevitables, y a finales de ese mismo año se promulgó la primera Constitución rusa. Sin embargo, todo ello fue insuficiente para resolver los conflictos. Durante la Primera Guerra Mundial aumentó el descontento general debido a las derrotas en el frente, la inflación, la escasez de alimentos y el deterioro generalizado del transporte, la sanidad, el alojamiento, etcétera. En febrero de 1917 hubo manifestaciones populares en Petrogrado, y el Gobierno dio orden al ejército de disparar contra la multitud. Los soldados desobedecieron y se unieron a los manifestantes, lo que supuso el inicio de la revolución que marcó todo el siglo XX en el mundo. El zar renunció al trono y se formó un Gobierno provisional, derrocado en octubre de ese mismo año por el movimiento encabezado por los bolcheviques.

Una de las primeras medidas del nuevo Gobierno de los sóviets, presidido por Lenin, fue firmar, en marzo de 1918, un armisticio con los imperios alemán, austro-húngaro y otomano para acabar con la impopular guerra, aun a costa de importantes concesiones territoriales. Naturalmente, el armisticio se firmó con la oposición de Gran Bretaña y Francia, los antiguos aliados de Rusia. La paz duró solo unos meses, pues se inició una guerra civil que duró cerca de tres años. Partidarios del zar y muchos de los antibolcheviques formaron el ejército blanco, con el apoyo de los antiguos aliados de Rusia. El Gobierno soviético impuso lo que se llamó *comunismo de guerra* que, entre otras cosas, pasó por la requisa forzosa de alimentos y productos agrícolas, así como la concentración del poder político en manos de los bolcheviques.

El impulso revolucionario de 1917 produjo cambios radicales en todos los sectores de la sociedad. En lo que se refiere a la educación, se suprimió todo tipo de barreras formales para facilitar el acceso de obreros y campesinos a centros que antes les estaban prácticamente vedados. Desaparecieron los títulos académicos, considerados «reliquias del pasado medieval». Así se explica que Landau pudiera ingresar en la universidad a pesar de su edad y sin haber logrado los títulos que normalmente se requerían en cualquier otro país. Sin embargo, para que la economía prosperase, durante los primeros años se admitió a los «especialistas burgueses», es decir, ingenieros, universitarios, militares, médicos... aunque no fueran partidarios de la Revolución soviética. Por lo que se refiere a la ciencia, las grandes reformas que algunos científicos habían propuesto sin éxito en los últimos años del zarismo fueron adoptadas rápidamente por el Gobierno bolchevique. Durante los años de la guerra civil, a pesar de la situación económica, de las privaciones y del hambre, se puso en pie un nuevo sistema de investigación y desarrollo. Se crearon institutos y laboratorios en torno a grandes proyectos interdisciplinares, que integraban a ingenieros y científicos. Se trataba de combinar la investigación fundamental con la aplicada, con fines civiles o militares, y relacionar ambas con la industria y la producción de nuevas tecnologías. La Academia de Ciencias de la URSS se convirtió en la sociedad científica más importante del país. Los nuevos institutos científicos y

técnicos dependían de la Academia, que durante bastantes años mantuvo una clara autonomía respecto del poder político. En 1934, cuando trasladó su sede desde Leningrado a Moscú, la Academia contaba ya con veinticinco institutos propios.

LA REVOLUCIÓN CUÁNTICA

A finales del siglo XIX, la física se basaba en dos grandes teorías, la mecánica de Newton y el electromagnetismo de Maxwell, cuya solidez se veía sustentada en su capacidad de explicar el mundo físico a cualquier escala. Se predijo la existencia de nuevos planetas en el sistema solar y fueron encontrados efectivamente allí donde los cálculos indicaban que estarían. Se predijo la existencia de ondas electromagnéticas y fueron confirmadas en el laboratorio, lo que dio origen a las comunicaciones por radio. Parecía que la física podía explicarlo todo. Sin embargo, los nuevos descubrimientos realizados a finales del siglo XIX y principios del siglo XX plantearon un reto que no pudo ser superado por la física clásica, cuyos límites de aplicabilidad fueron establecidos por la física moderna. Resumiremos a continuación algunas ideas de la física cuántica, para situar y apreciar las contribuciones de Landau.

LAS EXTRAÑAS PROPIEDADES DE LA LUZ Y LOS ELECTRONES

En 1900, el alemán Max Planck formuló una hipótesis muy especial para explicar el espectro de la radiación emitida por una cavidad al ser calentada. Supuso que la radiación de frecuencia f no puede intercambiar con la materia cualquier valor de energía, sino que solo puede hacerlo en cantidades discretas nhf, es decir, en múltiplos enteros de la frecuencia f de la radiación multiplicada por una constante h, que actualmente se llama *constante de Planck*. Esta constante aparece muchas veces dividida por el doble del número π, y por razones prácticas a este cociente se le ha dado un símbolo propio: $\hbar$ (se pronuncia hache barra) denominado *cons-*

tante reducida de Planck. Su valor es pequeñísimo: $\hbar \approx 10^{-34}$ en unidades del sistema internacional, o unidades a escala humana (kilogramos, metros, segundos...). Si se iguala a cero volveríamos a estar de nuevo en la física clásica, pero entonces no se podrían explicar las observaciones realizadas durante los experimentos, para lo que es necesaria la hipótesis de intercambios discretos de energía.

Einstein llevó más lejos esta hipótesis, y fue muy consciente de sus consecuencias revolucionarias para la física. En uno de sus famosos artículos de 1905, el que lleva por título «Sobre un punto de vista heurístico relativo a la producción y transformación de la luz», sugirió que la luz está formada por «cuantos de energía», por partículas que hoy llamamos *fotones*. El físico alemán pudo explicar así varios resultados, como las propiedades observadas en el efecto fotoeléctrico, o emisión de electrones por un metal al ser iluminado con luz ultravioleta. El estadounidense R. Millikan no estaba muy de acuerdo con aceptar la idea de los fotones, ya que contradecía «todo lo que sabíamos acerca de la interferencia de la luz». Llevó a cabo una serie de experimentos muy cuidadosos con la idea inicial de refutar la hipótesis de Einstein. Pero, tal como escribió en 1915, los resultados le llevaron «a proclamar su indudable verificación experimental».

La hipótesis de los fotones fue confirmada directamente en 1922 por el estadounidense A. Compton. Su experimento consistió en hacer incidir rayos X sobre átomos, y la colisión de aquellos con los electrones de estos se explicaba perfectamente como resultado de choques entre los fotones de los rayos X y los electrones. La hipótesis de los fotones y su verificación experimental planteaba una importante dificultad conceptual: ¿es la luz una onda o un conjunto de partículas? Después de largos años de debates y experimentos se había llegado a la conclusión de que la luz era un fenómeno ondulatorio. Se creía que se había establecido de modo irreversible, pero la existencia de los fotones indicaba lo contrario. En opinión de Einstein, ambas teorías de la luz debían mantenerse, a pesar de que no haya entre ellas ninguna conexión lógica. Pensaba que se acabaría llegando a una especie de fusión de las teorías ondulatoria y corpuscular.

En 1923, el francés Louis de Broglie sugirió que este comportamiento dual podría aplicarse también a otros objetos, como el electrón, al que cabría asociar una onda. De Broglie estableció que la longitud λ (lambda) de esta onda, y el momento lineal p (producto de la masa por la velocidad de la partícula) están relacionados a través de la constante de Planck: $p \cdot \lambda = h$. Esta relación fue verificada en 1927 por dos grupos distintos. Con diferentes diseños, ambos grupos observaron que los electrones producen interferencias, el fenómeno ondulatorio por excelencia, y confirmaron cuantitativamente la relación deducida por De Broglie. Por tanto, no solo la luz es una cosa extraña, a veces onda a veces corpúsculo, sino que este mismo comportamiento lo muestran los electrones y, en general, todo tipo de objetos cuánticos, cuando no se puede despreciar el pequeñísimo valor de la constante de Planck.

LA ESTRUCTURA DE LOS ÁTOMOS

Cuando se descubrió el electrón en 1897 se consideraba que el átomo, eléctricamente neutro, era una distribución de carga eléctrica positiva en la que están incrustadas las cargas negativas de los electrones. Pero en 1909 se realizó en Manchester un experimento que hizo abandonar esta idea. Los resultados de Geiger y Marsden fueron explicados por Rutherford en 1911 de la siguiente manera: en el centro del átomo existe un núcleo central de carga positiva que contiene prácticamente toda la masa del átomo; alrededor del núcleo hay electrones en número suficiente para asegurar que el átomo tenga carga eléctrica nula. Sin embargo, las leyes del electromagnetismo muestran que este modelo planetario es inestable, pues toda carga eléctrica acelerada emite radiación y pierde energía. Un electrón que gira alrededor del núcleo es una carga eléctrica sometida a aceleración, y por tanto emite radiación. Como no se repone la energía emitida, los electrones perderían su energía y colapsarían con el núcleo en un lapso muy corto de tiempo. Y este era un problema grave: la física clásica no podía explicar la estabilidad del átomo ni, en consecuencia, la estabilidad de la materia.

El danés Niels Bohr (1885-1962) llegó a Manchester en 1912 para hacer una estancia posdoctoral con Rutherford, y se encontró inmerso en las discusiones sobre la estructura de los átomos. De vuelta a Copenhague, Bohr estudió a fondo el problema. Para él era evidente que:

> [...] cualquiera que sea la modificación de las leyes del movimiento de los electrones, parece necesario introducir en las leyes en cuestión una cantidad ajena a la electrodinámica clásica, esto es, la constante de Planck.

Postuló que el electrón únicamente puede estar en ciertas órbitas, que llamó *estacionarias*, sin emitir radiación. Pudo así calcular los valores de las frecuencias del espectro de hidrógeno, encontrando un acuerdo muy satisfactorio con los valores medidos. En 1914, el experimento de Frank y Hertz demostró la existencia de estados estacionarios en los átomos. De manera que, mediante hipótesis razonables pero no justificadas, el modelo de Bohr era capaz de hacer predicciones que coincidían con los experimentos, y, por consiguiente, podía ayudar a entender la estructura de los átomos.

En 1916, el físico alemán Arnold Sommerfeld generalizó el modelo de Bohr introduciendo correcciones relativistas, lo que supuso una apreciable mejoría del acuerdo con los resultados experimentales. A partir de ese momento se desarrolló lo que se ha dado en llamar la *vieja teoría cuántica*. En ella se parte de la mecánica clásica y se postula que solo son aceptables las ecuaciones de movimiento que cumplan ciertas reglas de cuantificación, semejantes a las que postuló Bohr para el átomo de hidrógeno. El problema fundamental de esta «vieja teoría» es que sus reglas son solo restricciones a las leyes clásicas impuestas arbitrariamente, sin ningún criterio general que lo justifique. De hecho, el modelo de Bohr únicamente permite explicar el átomo de hidrógeno, y todos los intentos para extenderlo a otros átomos resultaron fallidos. La opinión general de los físicos que se dedicaban al estudio de la estructura atómica era que la física se encontraba en crisis, en un callejón sin salida.

Se hacía precisa una formulación más general, libre de tantas hipótesis arbitrarias y que permitiera abordar el estudio de átomos más pesados, entre otras cosas. Antes de encontrarla ya se le dio el nombre de *mecánica cuántica*. Fue desarrollada entre 1925 y 1926, mediante dos formulaciones distintas, y en apariencia contradictorias, que se denominaron *mecánica matricial* y *mecánica ondulatoria*.

La primera versión surgió en Gotinga, Alemania, y fue la idea inicial de Heisenberg, quien la completó después con Born y Jordan. Hacía intervenir un objeto matemático llamado *matriz* (simplificando, se trata de un tablero de números), a partir del cual se podían deducir las propiedades físicas observadas de los átomos. Para sus autores, su teoría era «la verdadera teoría del discontinuo», que sin necesidad de hipótesis adicionales permitía calcular las intrigantes propiedades de los átomos. Pero la mayoría de los físicos no le dieron una buena acogida, sobre todo porque no tenían los conocimientos matemáticos necesarios, ignoraban qué era una matriz y todo les resultaba muy complicado.

«Es un alfabeto mágico muy ingenioso, cuya complejidad le protege de cualquier intento de falsación.»

— EINSTEIN SOBRE LA MECÁNICA MATRICIAL.

La segunda versión fue elaborada en Zúrich por Schrödinger (1887-1961). Se basó en el carácter ondulatorio de las partículas, por lo que parecía oponerse a la teoría del discontinuo. Consiguió describir el movimiento del electrón en el átomo de hidrógeno en términos de una ecuación diferencial en derivadas parciales, la celebrada ecuación que lleva su nombre. Esto satisfizo a la mayoría de físicos, porque se encontraban en un terreno matemático familiar: el estudio de las ecuaciones diferenciales es un elemento básico de la formación de todo físico. Einstein escribió a Schrödinger:

> Estoy convencido de que usted ha hecho un avance decisivo con su formulación de la condición cuántica, al igual que estoy convencido de que el método de Heisenberg-Born es erróneo.

Pero Einstein estaba equivocado: el propio Schrödinger demostró la completa equivalencia entre las descripciones ondulatoria y matricial. Él mismo decía que si las dos teorías son equivalentes, elegir una u otra es solo una cuestión de gustos.

Los físicos empezaron a aplicar la mecánica cuántica para explicar una gran variedad de fenómenos. A su llegada a la universidad, Landau y algunos de sus amigos se pusieron a estudiar la nueva teoría para ser ellos mismos capaces de aplicarla al estudio de nuevos fenómenos físicos.

LOS TRES MOSQUETEROS Y LA JAZZ BAND

En el otoño de 1924, Landau llegó a Leningrado. Su intención era seguir los estudios de Matemáticas y Física, que formaban una única carrera al igual que en Bakú. Pero poco antes de su llegada, debido a los proyectos del Gobierno soviético sobre investigación, se habían separado los estudios en dos facultades distintas. Landau tuvo que tomar una decisión, y optó por la física. Nunca se arrepintió de ello ya que, en realidad, lo que más apreciaba de las matemáticas era su aspecto práctico, que permite resolver problemas complicados como los que se encuentran en física.

Leningrado era por entonces el principal centro científico de la URSS. La física se desarrollaba sobre todo en dos institutos dependientes de la Academia de Ciencias. El Instituto de Óptica estaba dirigido por D.S. Rozhdestvenski, un reconocido experto en espectroscopia. En él se diseñaban y construían instrumentos ópticos de calidad para usos militares, industriales o civiles. El Instituto Físico-Técnico de Leningrado (conocido como LFTI, por su nombre en ruso Leningradskii Fiziko-Tekhnicheskii Institut), estaba dirigido por A.F. Ioffe, quien creó una importante escuela de física experimental dedicada a lo que más tarde se llamó *física del estado sólido.*

Puede decirse que la física teórica en Rusia se inició, o al menos tuvo un impulso definitivo, con la estancia en San Petersburgo del físico austriaco Paul Ehrenfest, quien fue profesor de su universidad entre 1907 y 1912. Animó un círculo o tertulia informal de discusio-

PAUL EHRENFEST (1880-1933)



Ehrenfest estudió en la universidad de su Viena natal, y se dedicó a la física teórica por la influencia de Ludwig Boltzmann. En la Universidad de Gotinga, Alemania, conoció a la joven matemática ucraniana Tatiana Afanaseva, con quien se casó en 1904. Ambos fueron autores de un largo artículo de referencia sobre la mecánica estadística. En 1907 estuvieron en la Universidad de San Petersburgo, hasta que en 1912 le fue ofrecida a Ehrenfest la cátedra que Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) dejó en Leiden, Países Bajos, por su jubilación. Estos pocos años fueron suficientes para que Ehrenfest iniciara el desarrollo de la física teórica en la Universidad de San Petersburgo. Creó un seminario de discusión sobre las nuevas ideas físicas, que ejerció una gran influencia entre estudiantes y profesores. Entre sus aportaciones a la física hay que destacar sus estudios de los invariantes adiabáticos, su clasificación de transiciones de fase, los teoremas de Ehrenfest en mecánica cuántica, y sobre todo su capacidad crítica, que estimuló a tantos discípulos y colegas. Fue amigo íntimo de Einstein, con quien compartía no pocas críticas a la interpretación de Copenhague.

nes, abierta a físicos, matemáticos y químicos, en la que se daban a conocer y se discutían los últimos avances de la física moderna. En la tertulia participaban Rozhdestvenski y Ioffe, pero su labor más importante fue contribuir a la formación de los jóvenes estudiantes. Uno de ellos fue Y. Krutkov, quien realizó más tarde su tesis doctoral con Ehrenfest en Leiden, Países Bajos, cuando este fue nombrado catedrático de dicha universidad. Krutkov publicó en 1916 el primer libro en ruso sobre la teoría atómica, bien conocido por los estudiantes de la década de 1920. Cuando Ioffe, en 1918, fue nombrado catedrático de la Universidad de San Petersburgo, también organizó su propio círculo, que se convirtió en un paso casi obligatorio para completar la formación de los físicos de San Petersburgo.

En general, el ambiente en la universidad era muy informal, y Landau no solía asistir a las clases. Iba a la facultad un par de veces por semana para ver a sus amigos y enterarse de lo que pasaba. Las clases de Rozhdestvenski fueron la excepción, pues este no admitía en los exámenes a estudiantes que no hubieran asistido regularmente a clase. Solo tuvo un tropiezo académico con unos trabajos de laboratorio que no logró terminar a tiempo, lo que compensó con unos exámenes adicionales de matemáticas pocas semanas después. Landau estudiaba por su cuenta en casa los libros recomendados y en la biblioteca todo aquello que le parecía importante para aprender física, lo que incluía las revistas científicas especializadas.

Quedó fascinado por la teoría de la relatividad general. Recordemos que Einstein elaboró dos teorías de la relatividad. La primera, en 1905, es la llamada *teoría de la relatividad especial o restringida*. Dice cómo se han de formular las leyes físicas para que sean las mismas para observadores en distintos lugares y en distintos tiempos que se mueven entre sí con velocidad constante. Es decir, en contra de lo que su nombre sugiere, la relatividad tiene que ver con el carácter absoluto de las leyes de la física. En 1915 publicó su *teoría general de la relatividad*, que se ocupa de sistemas sometidos a aceleraciones. Se trata de una teoría de la gravitación, indispensable para conocer la estructura y evolución del universo a gran escala. La atracción gravitatoria se explica por la deformación del espacio tiempo en presencia de las masas. En su edad madura Landau recordaba a menudo que siendo estudiante se sintió fascinado ante la teoría general de la relatividad, como le ha debido suceder a todo «físico de verdad» al encontrar por primera vez esta teoría. A este respecto hay que mencionar el nombre de A.A. Friedman, un matemático de Leningrado que fue el primero en encontrar soluciones de las ecuaciones de la relatividad general que daban un universo en expansión, algo que Einstein tardó en aceptar.

Landau trabó amistad con George A. Gamow (1904-1968) y Dmitri D. Ivanenko (1904-1994). A pesar de la diferencia de edades, se hicieron muy amigos, pues tenían muchos intereses comunes, sobre todo la física y las bromas. Los tres iban siempre juntos, y

ABRAM FEDOROVICH IOFFE (1880-1960)



Ioffe estudió ingeniería en el Instituto Tecnológico de San Petersburgo. Después de trabajar como ingeniero, decidió dedicarse a la física, y entre 1902 y 1906 estuvo en Múnich con Röntgen, el descubridor de los rayos X. Los avances científicos más importantes se estaban produciendo en Alemania, y Ioffe pudo conocerlos de primera mano. Cuando Sommerfeld llegó a Múnich como profesor de Física Teórica, quiso seguir de cerca los trabajos experimentales que se realizaban en el laboratorio de Röntgen. Su interlocutor privilegiado fue Ioffe, lo que le permitió a este instruirse en los temas que interesaban a la física teórica del momento. En 1918 fue nombrado director de la División Físico-Técnica del Instituto Estatal de Radiología y Rayos X de San Petersburgo, que se convirtió tres años más tarde en el famoso LFTI, el Instituto Físico-Técnico de Leningrado, que hoy lleva su nombre. Creó y animó un importante grupo de investigación sobre la física del estado sólido y de los semiconductores, a la vez que impulsó la investigación en otros campos. Entre sus estudiantes más conocidos están Piotr L. Kapitsa, Yakov Frenkel e Igor Kurchatov. Además de su importancia en la investigación y la formación de físicos, hay que destacar su enorme capacidad organizativa. Como presidente de la Asociación Rusa de Físicos, organizó una serie de congresos que jugaron un importante papel en el desarrollo y la orientación de la física soviética. Impulsó la creación de institutos análogos al suyo en diversos lugares de la URSS. Si bien no llevó a cabo personalmente esta gran expansión de la física, intervino en muchas decisiones. Por todo ello se le suele considerar como el fundador de la física soviética.

los demás estudiantes no tardaron en llamarles los tres mosqueteros. Entre ellos se dieron apodos: Gamow era «Johnny», Ivanenko era «Dimus» y Landau era «Dau». Él solía bromear diciendo que este apodo dejaba bien a las claras el significado de su apellido si se pensaba en francés: *L'âne Dau*, es decir, el «asno Dau». Desde entonces, colegas, estudiantes y amigos le llamaron siempre Dau, lo que era muy de su agrado. Como es bien sabido, los tres mos-

queteros eran cuatro: en este caso se trataba de Matvei Bronstein (1906-1938), quien se incorporó al grupo en 1926, con el apodo «Abate».

Estos amigos formaban un grupo muy extravagante de estudiantes inconformistas y gustosos de novedades. En realidad era un círculo de discusiones, al que dieron el nombre de *Jazz Band de Leningrado*. Para integrarse en el grupo había que mostrar una gran capacidad de crítica e ironía, de las que nadie ni nada quedaba a salvo. Los mosqueteros tenían también una musa, Evgenia Kanegiesser, familiarmente llamada «Genia», estudiante como ellos y aficionada a escribir versos. Así describió el ambiente de la biblioteca donde se reunían, y un rasgo fundamental del joven Landau:

> Aquí escucha Ivanenko, dormitando,
> un caramelo en la boca, a ritmo de rag,
> mientras Gamow da enormes bostezos, anunciando
> los innumerables bombones que se zampa.
> Suena la melodía... Landau el inteligente,
> siempre dispuesto a discutir en cualquier lugar,
> en cualquier momento, con cualquiera,
> mantiene una discusión con una silla...

Los miembros de la Jazz Band no solo estaban interesados por la física, sino también por la poesía, la historia, el arte, el cine. Landau siempre consideró que la poesía era parte importante de su vida. En 1960, como figura célebre de su país, le pidieron que contribuyera con unas líneas a la celebración del «Día de la poesía». Esto fue lo que escribió:

> ¿Para qué sirve la poesía? Una pregunta tan difícil de responder como ¿para qué sirve el amor? A quien le gusta, la poesía ilumina y embellece la vida. A mí me faltaría algo sin mis poemas favoritos, que me puedo recitar siempre que quiera. Mi poeta favorito es Lérmontov. Cómo escribir buenos poemas es algo que, desde luego, no se puede explicar teóricamente. Si lo fuera, todo el mundo podría escribir maravillosos poemas. Solo un verdadero poeta puede causar profundos sentimientos en el lector.

Para entender sus gustos poéticos, hay que señalar que Mijaíl Lérmontov (1814-1841) fue un poeta romántico que a pesar suyo era, y sigue siendo, comparado con Byron.

Gamow escribió en sus memorias que en aquellos años podían ver películas de Hollywood; también había películas rusas, pero las encontraban aburridas y pura propaganda política. Todos tenían sus propias opiniones sobre la situación política, con sus filias y fobias, pero ningún miembro del grupo pertenecía al Partido Comunista. Tras la muerte de Lenin en 1924, se inició una lucha en la cúpula comunista para hacerse con el poder, con las figuras visibles de Stalin, Bujarin y Trotsky. La mayoría de estudiantes de Leningrado se manifestaron a favor del grupo de oposición de izquierdas de Trotsky. Landau había crecido en el desprecio hacia la autocracia zarista y la admiración por la Revolución soviética y su líder Lenin. Se declaraba marxista y, como muchos jóvenes de tendencia radical, no perdía ocasión de menospreciar a la «pequeña burguesía». Para Gamow, Landau era en aquellos años un ardiente marxista, simpatizante de la línea más izquierdista.

Landau era un tímido introvertido desde su infancia. Tuvo una adolescencia frustrada y un precoz inicio a la juventud. Estaba entre estudiantes mayores que él y más maduros en muchos aspectos, a los que sin embargo superaba en capacidad intelectual y conocimientos. Todo ello hacía que sintiera una gran inseguridad en sus relaciones con los demás. Para superar su timidez, su mente racionalista le inspiró un tratamiento de choque muy especial. Pensaba que la timidez era algo irracional que solo podía superarse de manera racional, y para ello debía esforzarse en adoptar actitudes excéntricas. Por ejemplo, pasearse por la calle más concurrida de Leningrado con un globo rojo atado al pelo como manera de superar el miedo al ridículo. La provocación, la insolencia y la mala educación también formaban parte de su especial terapia de comportamiento. Muy a su pesar, esta terapia no le daba buenos resultados con las chicas, lo que parece normal teniendo en cuenta su edad. Pero ello no le impedía hacerse el experto y aconsejar a sus amigos sobre los mejores métodos para tener éxito con las mujeres. El contacto con el grupo Jazz Band, junto con su terapia particular, acabó por darle una gran seguridad en sus relaciones con los demás.

Una de las actividades preferidas de los tres mosqueteros era la redacción de una revista mural. Las revistas científicas más importantes del momento estaban escritas en alemán, que los físicos soviéticos conocían, al menos para leer y escribir artículos científicos. El título de la revista mural, *Physicalische Dummheiten* (es decir, «estupideces físicas») ya anunciaba la parodia. Se colgaba, sin previo aviso, en la sala donde se daba el seminario de Física. Siempre creaba un cierto revuelo entre los presentes, porque en ella se ridiculizaban los errores que los tres mosqueteros habían detectado en las revistas científicas usuales.

> «Me sentí sacudido por la increíble belleza de la teoría de la relatividad general.»
>
> — Lev Davidovitch Landau.

Normalmente, en cualquier disciplina los jóvenes empiezan aprendiendo a través de algún maestro. Pero en la década de 1920, la mecánica cuántica no existía como tal disciplina, pues se estaba elaborando en ese momento. El único modo de aprenderla era leer y estudiar los artículos publicados en las revistas especializadas. Landau empezó con los artículos de Schrödinger de 1926. Decía a sus amigos que, a pesar de no entenderlos completamente, su lectura le resultó tan deslumbrante como su primer encuentro con la teoría de la relatividad. Cuando estudiaba el segundo artículo de Schrödinger, se enteró de que existía una mecánica matricial que parecía contradecir lo que estaba leyendo. Pero con el tercer artículo, supo que las mecánicas matricial y ondulatoria eran en realidad equivalentes. Los amigos de Landau siguieron el mismo proceso de aprendizaje, y todos ellos estaban entusiasmados con estas lecturas. Esto resulta sorprendente, pues en aquellos años todavía se avanzaba a tientas, con artículos que no llevaban a ninguna parte y otros que indicaban el camino a seguir. Tenían que escoger por sí mismos cuáles valía la pena estudiar a fondo. Y como veremos a continuación, fueron capaces de hacer inmediatamente trabajos aceptables sobre esta nueva disciplina.

En el verano de 1926 Vladimir A. Fock (1898-1974), un joven físico del Instituto de Óptica de Leningrado, publicó en la revista

alemana *Zeitschrift für Physik* una posible generalización de la ecuación de Schrödinger para incluir la relatividad restringida. Fue sin duda la primera contribución significativa a la mecánica cuántica hecha por un físico soviético. El nombre de Fock aparece en libros de texto actuales asociado a conceptos como espacio de Fock, estado de Fock o método de Hartree-Fock, entre otros, lo que indica la importancia de sus contribuciones. Es interesante recordar la historia de la ecuación de Schrödinger, pues da una idea de la actividad intensa que en aquellos años se desarrollaba en torno a la mecánica cuántica. Schrödinger obtuvo primero una ecuación para explicar el átomo de hidrógeno, compatible con la relatividad restringida y la mecánica cuántica. Pero la desechó porque no reproducía los datos observados. Al poco tiempo publicó, en enero de 1926, su conocida ecuación, que es válida en el límite no relativista. Una vez publicada esta ecuación hubo otros físicos, como Fock, que pensaron en extenderla al caso relativista y, sin saberlo, siguieron el mismo camino que Schrödinger había descartado. La ecuación que quedó en sus notas inéditas se conoce como ecuación de Klein-Gordon, que describe partículas con espín nulo.

Con posterioridad al trabajo de Fock, aparecieron dos breves artículos en la misma revista alemana. Uno de ellos fue escrito por Ivanenko y Gamow («Sobre la teoría ondulatoria de la materia»), con algunas consideraciones sobre la ecuación de Schrödinger. En el otro artículo («Sobre la derivación de la ecuación de Klein-Fock»), Ivanenko y Landau estudiaron algunos aspectos del trabajo de Fock. Poco después, Landau publicó otro artículo como único autor («Sobre la teoría espectral de las moléculas diatómicas»), en el que aplicaba la mecánica matricial al estudio de moléculas formadas por dos átomos, sin saber que otros físicos acababan de publicar un estudio parecido. Es muy sorprendente que estos estudiantes de física estudiaran por su cuenta los artículos originales y fueran capaces de hacer comentarios o cálculos dignos de ser publicados. Esto muestra el dominio que ya habían adquirido de los conceptos y técnicas de la recién creada mecánica cuántica.

En cualquier otro país y en cualquier otro momento habría sido impensable que unos estudiantes de licenciatura pudieran

hacer una investigación autónoma y enviaran a publicar artículos sin el apoyo y la autorización de un profesor, que normalmente sería el director de su tesis doctoral. Pero en aquel ambiente, contrario a jerarquías y tradiciones, la cuestión ni se planteaba. Además, con la excepción de Fock, Frenkel y alguno más, los físicos soviéticos no seguían los avances de la nueva teoría, al menos no tan rápidamente como lo hacían Landau y sus amigos. Puede decirse que para ellos, la mecánica cuántica era parte integral de su cultura juvenil. Además, les ofrecía una ocasión espléndida para criticar a físicos como Ioffe y Rozhdestvenski, quienes a ojos de estos jóvenes encarnaban la autoridad y el pasado. A comienzos de 1927, Landau acabó sus estudios universitarios, dos días antes de cumplir diecinueve años. Como examen final, presentó su artículo sobre las moléculas diatómicas. Según se cuenta, Rozhdestvenski le dijo que no había entendido nada del trabajo, «pero probablemente es muy inteligente». Es cierto que estos físicos experimentales no dominaban la nueva teoría, pero los ataques eran bastante injustos, sobre todo en el caso de A.F. Ioffe. En numerosas ocasiones defendió ante instancias oficiales la necesidad de enseñar la relatividad y la mecánica cuántica, manteniéndolas fuera del debate ideológico promovido por la ortodoxia marxista.

LOS ESTUDIOS DE DOCTORADO

Landau empezó a trabajar como «aspirante» en el LFTI. Esta categoría corresponde a los estudiantes de doctorado, pero durante los años en que los títulos estaban abolidos, solo significaba el primer escalón en la carrera de un científico. Se integró en el grupo de física teórica dirigido por Yakov I. Frenkel (1894-1952). Poco después hizo su primer trabajo de importancia («El problema del amortiguamiento en mecánica cuántica»), que fue publicado en 1927. De manera muy simplificada se puede resumir así. La función de ondas de un sistema cuántico contiene toda la información física del mismo. Supongamos que el sistema está formado por dos subsistemas y queremos obtener información solo sobre uno de ellos. La cosa es sencilla si la función de ondas se puede escribir como un pro-

ducto de dos funciones de onda, una para cada subsistema, pero en general no se puede hacer esta factorización. Lo que hizo Landau fue mostrar cómo conocer los resultados de las medidas sobre un subsistema con independencia del estado en que se encuentre el otro. A pesar de su importancia, el artículo no tuvo repercusión, porque otros dos físicos llegaron al mismo resultado. El suizo Félix Bloch (1905-1983), que estaba haciendo su tesis doctoral con Heisenberg en Leipzig, publicó un artículo con razonamientos muy parecidos a los de Landau. Pero sobre todo, el matemático húngaro John von Neumann (1903-1957) publicó una elaboración rigurosa del problema, basado en las propiedades de lo que se llama la *matriz densidad*, que se convirtió en la referencia en este tema.

EL VIAJE FORMATIVO

Cuando acabó la guerra civil, la Academia de Ciencias presentó un informe al Gobierno soviético sobre la crítica situación de la ciencia. El aislamiento de los últimos años requería con urgencia que se restablecieran los contactos científicos con otros países. El Gobierno decidió enviar delegaciones al extranjero para comprar nuevos instrumentos, libros y revistas científicas; Ioffe y Rozhdestvenski se ocuparon de la parte de la física. A la vez, se puso en marcha un programa para permitir que algunos científicos completaran su formación en universidades extranjeras, lo que jugó un papel esencial para la actividad científica en la URSS. Frenkel fue uno de los primeros en salir al extranjero y, cuando fue elegido miembro correspondiente de la Academia de Ciencias, se ocupó de que los jóvenes físicos teóricos fueran incluidos en este programa. Del grupo de amigos de Landau, el primer beneficiario fue Gamow, quien ya gozaba de renombre internacional por haber explicado la desintegración alfa de los núcleos. Más tarde, Frenkel consiguió la financiación y los permisos necesarios para Landau.

Durante unos dieciocho meses, Landau pudo visitar los centros europeos más importantes para su formación, sobre todo Zúrich y Copenhague. Conoció a otros físicos jóvenes que, como él,

estaban completando su formación, como el ruso Y.B. Rumer (1901-1985), el alemán R. Peierls (1907-1995), el húngaro E. Teller (1908-2003), el neerlandés H. Casimir (1909-2000) o el belga L. Rosenfeld (1904-1974). Entre estudiantes en estancia posdoctoral se establece a menudo una buena amistad y un buen número de discusiones sobre física, lo que forma parte imprescindible del aspecto formativo de estas estancias. Para cualquier científico, pero tal vez más para un físico teórico, es muy importante poder intercambiar ideas, aunque no sean siempre ni geniales ni buenas, para aprender durante el proceso de debatirlas y criticarlas.

La primera etapa de su viaje fue Berlín, en otoño de 1929, para asistir a un encuentro sobre física teórica en el que conoció a Yuri B. Rumer, que estaba de asistente con Born en Gotinga. Después de hacer una corta visita a Heisenberg, en Leipzig, viajó a Zúrich para pasar unos meses con Pauli. Su ayudante en aquel entonces era Rudolf Peierls, quien había realizado su tesis doctoral con Heisenberg. Por cierto, Peierls se casó en 1931 con Genia, la poetisa de la Jazz Band. Según Peierls, todos los colegas de Zúrich estaban impresionados por los conocimientos de Landau, por su agudeza y por su dominio de la física. Tenía una gran intuición y normalmente no se preocupaba en demostrar afirmaciones que para él eran obvias. Si su interlocutor le decía que no eran tan obvias, le respondía que en tal caso no debía ser físico. Pero como decía Peierls, en realidad no eran nada obvias: Landau podía escribir en la pizarra cosas como la raíz cuadrada del operador laplaciano, que contiene derivadas de segundo orden. Este tipo de manipulaciones algebraicas, que parecen ignorar el rigor matemático, solo se pueden entender en el contexto de sus transformaciones de Fourier, lo que requería un esfuerzo añadido para los estudiantes de aquella época.

Peierls se ha referido varias veces a la manera peculiar que tenía Landau de juzgar un artículo de física teórica. Si el asunto le parecía interesante, trataba de ver qué pretendía hacer el autor. Nunca intentaba seguir los detalles del trabajo, sino que hacía sus propios cálculos. Si el artículo llegaba a sus mismas conclusiones, se trataba de un buen artículo. Sin duda era una costumbre que adquirió durante su formación autodidacta, pero eso refleja la gran seguridad que había alcanzado en cualquier tema de física teórica.

Una vez establecida la mecánica cuántica, se empezó a aplicar a problemas como la conducción eléctrica de los metales, las propiedades del estado sólido, la radiactividad o la estructura de los núcleos. Desde un punto de vista más conceptual, se empezaba a explorar la electrodinámica cuántica, o sea la teoría cuántica y relativista del campo electromagnético y su interacción con la materia. Los primeros trabajos sobre el tema fueron desarrollados por Jordan, y en especial, por Dirac, a quien se considera «padre» de la electrodinámica cuántica. Otros pioneros en este terreno fueron Pauli y Heisenberg, que pronto descubrieron que era mucho más complicado de lo que parecía. En cualquier formulación que se intentara aparecían unas cantidades infinitas que imposibilitaban cualquier cálculo. Peierls y Landau intentaron encontrar una solución. Pensaron en formular una ecuación para los fotones análoga a la de Schrödinger para los electrones, pero se encontraron con bastantes dificultades. Como los fotones se crean y destruyen (pues son absorbidos y producidos en su interacción con la materia), en lugar de una sola ecuación tuvieron que escribir una serie completa de ecuaciones para considerar todas las posibilidades: sin fotones, con un fotón, con dos fotones, etcétera. El resultado era muy complicado y no llegaron a deducir nada interesante, pero el trabajo tuvo el beneplácito de Pauli y fue publicado en 1930. Pocos años después quedó claro que trabajar en el espacio de configuraciones con los fotones no es lo más apropiado. La formulación actual de la electrodinámica cuántica, que explica qué hay que hacer con los desagradables infinitos, no llegó hasta finales de la década de 1940, con los trabajos de J. Schwinger, R. Feynman y S. Tomonaga.

Suiza no tenía relaciones diplomáticas con la URSS, y el permiso de residencia de Landau era solo de tres meses. La intervención de Pauli y las autoridades académicas lograron que se le prolongara unas semanas. Tras otra intervención, se le renovó solo por una semana, y finalmente Landau tuvo que abandonar Suiza. Landau bromeaba diciendo que Lenin estuvo durante años en Suiza y no consiguió hacer una revolución, pero sin duda las autoridades suizas pensaban que él podría conseguirlo en unas semanas.

Pauli era famoso por su mordacidad y sus críticas despiadadas, pero el joven Landau no se quedaba atrás. Así que las discusiones entre Landau y Pauli eran memorables, tanto por el fondo como por la forma. Según cuenta Peierls, al acabar una de ellas, Landau le dijo: «Profesor Pauli, ¿hoy no me repite que todo lo que he dicho es absurdo?». A lo que el profesor le respondió: «No, al contrario. Lo que ha dicho es tan confuso que ni siquiera se puede decir que sea absurdo». Sin embargo, Pauli apreciaba muchas de las ideas de Landau por su originalidad.

LA BECA DE LA FUNDACIÓN ROCKEFELLER

De Zúrich regresó a Leipzig, aunque tenía que viajar constantemente a la embajada soviética en Berlín. La financiación del Gobierno solo le cubría seis meses, y Landau pedía una prolongación. Finalmente, gracias de nuevo a la intervención de Frenkel, obtuvo una beca de la Fundación Rockefeller que le permitió continuar su periplo europeo durante un año más. En abril de 1930 se fue a Copenhague para asistir a un congreso sobre la teoría cuántica del electrón, cuyo tema central era la ecuación que el inglés P.A.M. Dirac obtuvo para describir la dinámica cuántica y relativista del electrón.

La siguiente etapa del viaje fue Leiden, en los Países Bajos. Allí pudo discutir con Ehrenfest, y también con Bloch, quien estaba en la vecina ciudad de Haarlem. Después de unas semanas se fue a Cambridge, donde se encontraba su amigo Gamow. Juntos se tomaron unas vacaciones por Escocia, viajando en una motocicleta de segunda mano que Gamow había comprado. A su regreso, asistió a la reunión de la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia, que se celebraba en Bristol. En esta reunión, Dirac habló de su conjetura sobre los huecos en el mar de estados de energía negativa, que identificó con los protones, a pesar de que su masa es casi dos mil veces mayor que la de los electrones. Landau resumió esta charla en un telegrama a Bohr, que tenía una única palabra: *Quatsch*, es decir, basura. El final de esta historia es que los estados de energía negativa son electrones con carga

positiva, o positrones, que fueron descubiertos en 1932 por el estadounidense Carl Anderson.

En Cambridge conoció a Kapitsa, un físico ruso de gran importancia para la física, para la URSS y para el propio Landau, como tendremos ocasión de ver. Landau escribió un artículo con las ideas que, desde el inicio de su viaje, había ido desarrollando acerca del comportamiento de los electrones en metales en presencia de un campo magnético. Fue publicado en julio de 1930, y en él dio las gracias a Kapitsa por las discusiones sobre sus experimentos y por haberle comunicado algunos datos aún inéditos. En el mes de octubre se celebró en Bruselas el VI Congreso Solvay, y Pauli presentó los resultados de Landau. Se acababa de cimentar su fama europea. Al final de este capítulo daremos algunos detalles de este importante artículo, que ha dado origen a lo que se conoce como *diamagnetismo de Landau*.

Los últimos siete meses de su estancia formativa los pasó entre Copenhague y Zúrich. El nuevo ayudante de Bohr era el neerlandés Hendrik Casimir, quien ha escrito algunos recuerdos interesantes sobre Landau y sobre esta visita. En una carta a uno de sus amigos describía a Landau como alguien muy inteligente, bastante gruñón, pero agradable. Se hicieron muy amigos y junto con Gamow, que también estaba en Copenhague, formaron un trío que se divertía mucho. Pero, como reconocía Casimir, tal vez sus bromas no eran del agrado de todos.

Landau llegó con algunas ideas acerca de la electrodinámica cuántica que se proponía discutir con Bohr. Ya hemos mencionado los problemas que se presentaban al intentar elaborar una teoría del electromagnetismo consistente con la relatividad y la mecánica cuántica. Landau creyó encontrar una posible salida. Pensaba que la relatividad y la cuántica imponían limitaciones a las medidas del campo electromagnético más restrictivas que las contenidas en el principio de indeterminación. Si se aclaraba este problema se encontraría una vía para eliminar los infinitos que plagaban los intentos realizados hasta ese momento. Pero Bohr no estaba en absoluto de acuerdo con la idea, y esto dio lugar a una interminable discusión en la que uno trataba de convencer al otro de sus puntos de vista.

La discusión se interrumpió cuando Landau se fue a Zúrich. Allí planteó sus puntos de vista a Pauli y sobre todo a Peierls, con quien decidió escribir un artículo sobre el asunto. A finales de febrero de 1931, L. Rosenfeld llegó al instituto de Bohr para hacer una estancia de un año. La primera persona que encontró fue Gamow, y le preguntó por los problemas que se estudiaban en ese momento. La respuesta de Gamow, que siempre ha sido un humorista y buen dibujante, fue un dibujo que acababa de hacer. En él se veía a Landau, atado a una silla, amordazado y gesticulando. Bohr estaba delante de él, con el índice levantado, implorándole: «Por favor, por favor, Landau, ¿puedo decir solo una palabra?». Unos días antes Landau y Peierls habían llegado a Copenhague con su manuscrito, y lo estaban discutiendo con Bohr, «quien no parece estar muy de acuerdo», decía Gamow de manera suave.

> «Una discusión entre Bohr y Landau sobre cualquier tema, dentro o fuera de la física, es un espectáculo espléndido.»
>
> — Casimir en una carta a Ehrenfest.

El artículo fue publicado sin que Bohr quedara convencido. Y ello planteó a los autores una situación embarazosa, porque si al final del artículo agradecían las discusiones mantenidas con Bohr, podría interpretarse que este estaba de acuerdo con el contenido. La situación embarazosa era más bien para Peierls, más sensible que Landau a este tipo de cosas. Finalmente, el artículo no mencionó estas discusiones. Bohr propuso a su nuevo visitante, Rosenfeld, trabajar en este tema para refutar el artículo de Landau y Peierls. Tardaron dos años en publicar una respuesta adecuada, en la que demostraban que la medida de los campos electromagnéticos se puede hacer con la precisión permitida por las relaciones de indeterminación convencionales, sin necesidad de buscar nuevas relaciones. Naturalmente, ni los distintos puntos de vista ni las intensas discusiones entre Bohr y Landau alteraron las excelentes relaciones que mantenían.

Casimir habla de otros aspectos de la personalidad de Landau. En su segunda estancia en Copenhague se propuso aprender da-

nés, y para ello leía una antología escolar de poesía que tenía la dueña de la pensión. Landau se aprendió de memoria algunos poemas, buscando siempre metro y rima estrictos, porque le gustaba mucho recitar. Sin embargo, las dos primeras palabras danesas que pidió conocer fueron «despreciable» y «burgués». Es lo que necesitaba para manifestar su desdén por la sociedad burguesa. Lo divertido, cuenta Casimir, es que la primera, *mindrevaerdig*, cambia completamente de sentido si se le quita una letra: *mindevaerdig* significa «memorable», así que a menudo Landau se encontraba diciendo lo que no quería.

Landau se creía obligado a mostrarse impertinente, incluso ofensivo, ante todo aquello que le parecía reflejar una sociedad superada por la Revolución soviética. Los testimonios de sus colegas coinciden en caracterizar a Landau como «un ardiente marxista, partidario de Trotsky» o «un ferviente comunista», que no dejaba pasar ninguna ocasión para poner de manifiesto los fracasos sociales que observaba en la sociedad capitalista. Pero, como no podía ser menos, el marxismo de Landau no era el más ortodoxo, y tenía su toque de originalidad. Así, consideraba que la teoría histórica y social del marxismo (el materialismo histórico) era un ejemplo fundamental de verdad científica. Pero también rechazaba la filosofía marxista del materialismo dialéctico como un absurdo total, cosa que por otra parte opinaba de cualquier filosofía.

Poco antes de regresar a Leningrado, dio una charla-coloquio para dar a conocer a los estudiantes la situación de las universidades soviéticas. En un momento le pidieron que hablara de la libertad de pensamiento y de cátedra. En su respuesta, Landau dijo que había que distinguir entre las disciplinas importantes y las que no tienen ningún sentido. Entre las primeras ponía a las matemáticas, la física, la astronomía, la química y la biología. Y entre las segundas, la teología, la filosofía, la sociología y otras «pseudociencias». Afirmó que en la URSS existía completa libertad de enseñanza y de doctrina en las disciplinas importantes. «Respecto a las otras, he de admitir que se prefiere cierto modo de pensar. Pero después de todo, es completamente irrelevante que se prefiera un tipo de absurdo a otro.» Treinta años después de su periplo, en 1961, Landau hacía estas valoraciones:







FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
David Landau con su esposa, Lyubov Veniaminovna Harkavi, posando junto a sus dos hijos, Sofía y Lev, en 1910.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
Fotografía de un grupo de amigos bien avenidos: en primer término, Lev Landau, junto a su amigo Dmitri Ivanenko, dos de los integrantes de «Los tres mosqueteros», y de espaldas, Evgenia Kanegiesser, Genia, la musa y poetisa del grupo.

FOTO INFERIOR:
Fotografía de 1931 tomada en Copenhague, durante la segunda visita de Landau (a la izquierda) al Instituto de Bohr. Junto a Landau está Gamow (sobre su moto) y Edward Teller (en esquís). Los niños son dos de los hijos de Bohr.

> Este viaje fue muy importante para mí. Me reuní con todos los grandes físicos. La única excepción fue Enrico Fermi, y ahora ya no podré hacerlo. Era un placer hablar con cualquiera de ellos. Ninguno mostraba el más mínimo asomo de orgullo, pretenciosidad o arrogancia.

EL DIAMAGNETISMO DE LANDAU

Vamos a resumir ahora la primera contribución importante de Landau a la física, cuya motivación fue el estudio del comportamiento de los metales cuando son colocados en un campo magnético.

Un material siempre reacciona al ser introducido en un campo magnético y se magnetiza en mayor o menor grado. Algunos materiales, llamados *ferromagnéticos*, pueden tener una magnetización espontánea sin necesidad de aplicarles un campo. Es el caso de ciertos compuestos de hierro, cobalto, níquel o algunas tierras raras, con los que se fabrican los imanes permanentes. Los demás materiales se clasifican en paramagnéticos o diamagnéticos, según que se magneticen a favor o en contra del campo externo, lo que depende de la composición y la estructura del material. La susceptibilidad magnética indica cómo varía la magnetización del material con respecto al campo externo. Es positiva si el material es paramagnético y negativa si es diamagnético. En este último caso, hay una repulsión que tiende a que el campo magnético externo no penetre en el interior del material diamagnético.

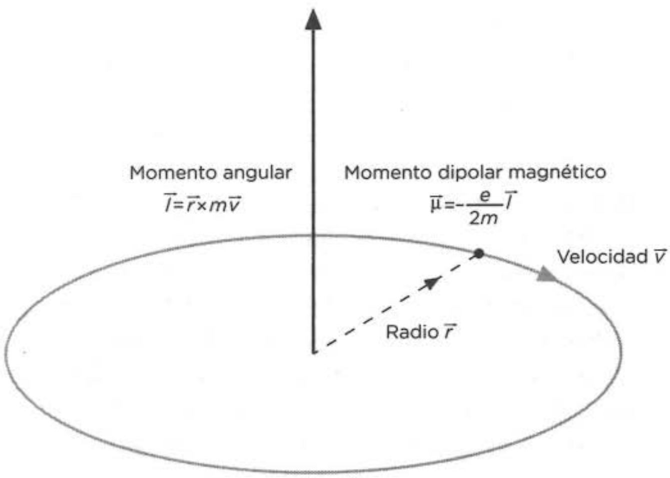
La explicación de este fenómeno tiene que ver sobre todo con los electrones que están en el material y, de manera esquemática, se puede resumir como sigue. Los átomos con un número impar de electrones poseen un momento dipolar magnético permanente, y se comportan como una pequeña brújula. Las orientaciones de estas brújulas son aleatorias, pero si se aplica un campo magnético externo tenderán a orientarse en su dirección, y en este caso el material es paramagnético. Según sea la temperatura, habrá más o menos brújulas orientadas en la misma dirección; la susceptibilidad del material es una cantidad positiva que varía de manera inversamente proporcional con la temperatura. Esta es la llamada

ESPIRA ELÉCTRICA EN UN CAMPO MAGNÉTICO

Una espira de un hilo conductor por la que circula una corriente eléctrica se comporta como una brújula, caracterizada por un momento dipolar magnético (véase la figura). Un electrón, de carga eléctrica $-e$, moviéndose en una trayectoria circular de radio r con velocidad v es asimilable a una corriente eléctrica por una espira circular. El período de su movimiento viene dado por $T=2\pi r/v$, y es el tiempo que tarda en dar una vuelta completa. La intensidad de la corriente eléctrica es la carga eléctrica que circula por unidad de tiempo, y el electrón que se mueve en la órbita circular equivale a una corriente eléctrica de intensidad $I=-e/T$. En su movimiento circular, el electrón tiene un momento angular $\vec{l}=\vec{r}\times m\vec{v}$ (el símbolo × indica el producto vectorial), que es un vector perpendicular al plano de la órbita. El momento magnético es también un vector perpendicular al plano de la espira, y su módulo viene dado por el producto de la intensidad I y el área πr^2 de la espira. El resultado se puede escribir como:

$$\vec{\mu}=-\frac{e}{2m}\vec{l}.$$

Este momento magnético permite asimilar el movimiento de un electrón en una órbita atómica circular como una pequeña brújula. Además de este momento magnético «orbital», el electrón posee un momento magnético intrínseco, que se llama *espín*, y es una característica que no poseen las partículas clásicas. La energía de interacción del dipolo con un campo magnético $\vec{B}$ viene dada por el producto escalar $\vec{\mu}\cdot\vec{B}$.



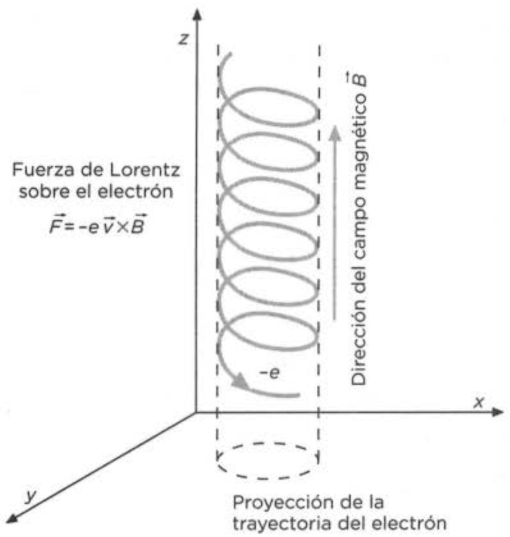
ley de Curie, descubierta por Pierre Curie en los trabajos de su tesis doctoral publicada en 1895, el mismo año en que conoció a quien se convertiría en su famosa esposa. Pero si los átomos del material tienen un número par de electrones, su comportamiento en un campo magnético es distinto: se crea un momento dipolar inducido que se opone a la dirección del campo, de acuerdo con lo que se conoce como *ley de Lenz*. El material es diamagnético.

Esta explicación sobre los electrones en un átomo no sirve en el caso de los metales. Su estructura microscópica consiste en una red, más o menos regular, de iones positivos, y un conjunto de electrones que se pueden mover libremente a través de dicha red, denominados *electrones de conducción*. Debido a su mayor movilidad, estos electrones aportan la contribución más importante a las propiedades eléctricas y magnéticas. A finales de la década de 1920, Pauli fue el primero en aplicar la mecánica cuántica para explicar el origen del magnetismo de los metales. Los electrones poseen una propiedad específicamente cuántica llamada *espín*, que hace que se comporten como una pequeña brújula, que se orienten en la dirección del campo. Hasta aquí todo parece ser semejante a la explicación anterior. La diferencia importante es que en los metales hay un conjunto muy grande de electrones, y han de satisfacer ciertas propiedades cuánticas. Pauli tuvo en cuenta que los electrones son fermiones, y por lo tanto han de satisfacer el principio de exclusión, es decir: no puede haber más de dos electrones en el mismo estado cuántico. Los cálculos con un gran número de electrones deben hacerse con la estadística adecuada para los fermiones. El resultado es que la susceptibilidad magnética es independiente de la temperatura, cosa que está de acuerdo con las observaciones experimentales a temperaturas suficientemente bajas. El fenómeno es conocido como *paramagnetismo de Pauli*.

En 1930, Landau observó que el razonamiento de Pauli era incompleto. Cuando un electrón describe una órbita cerrada, como cuando está ligado a un átomo, crea un campo magnético que contribuye al valor de la susceptibilidad magnética. En el caso de los electrones de conducción en un metal, no existen órbitas cerradas y por lo tanto no cabe considerar dicho efecto. Sin embargo,

MOVIMIENTO DE UN ELECTRÓN EN UN CAMPO MAGNÉTICO

Cuando una partícula cargada se mueve en una región en la que hay un campo magnético constante, aparece sobre ella una fuerza, llamada *fuerza de Lorentz*, que le hace curvar su trayectoria. Dependiendo de si la carga de la partícula es positiva o negativa, avanza a favor o en contra de la dirección del campo magnético, siguiendo una trayectoria espiral (véase la figura). Este resultado se aplica al caso de un electrón que se mueve libremente en el interior de un metal.



Landau se dio cuenta de que el campo magnético externo curva la trayectoria de una carga eléctrica. Estudió el movimiento de los electrones en presencia de un campo magnético y vio que siguen un movimiento helicoidal. El movimiento en un plano perpendicular al campo está cuantificado, de manera análoga a las órbitas electrónicas en un átomo. Calculó la contribución a la susceptibilidad y encontró que era negativa, por lo que contribuye a las propiedades diamagnéticas. En valor absoluto, es tres veces menor que la susceptibilidad paramagnética, por lo que el efecto dominante es paramagnético.

Pocos meses después de que Landau publicara su estudio, se dio a conocer el «efecto de Haas-Alphen». Estos dos físicos de Leiden observaron que cuando un metal cristalino puro se coloca en un campo magnético, su momento magnético oscila al aumentar la intensidad del campo. Luego se vio que hay otras magnitudes que también oscilan, como la resistividad (el efecto Shubnikov-Haas), el calor específico o la atenuación del sonido, que serán explicadas más adelante. En todos los casos, las oscilaciones se explican por la cuantificación de las órbitas de los electrones en un campo magnético externo. También es importante esta cuantificación para conocer las propiedades de ciertas estrellas, siempre que haya partículas cargadas, como los electrones, en presencia de un campo magnético.

CAPÍTULO 2

Historias de frío y de fases

El viaje europeo hizo de Landau un científico maduro, y volvió a la URSS dispuesto a conseguir que la física teórica alcanzara el nivel que había conocido en los centros visitados. Landau mostró sus dotes como maestro en Járkov, Ucrania, e inició lo que pronto se conoció como la escuela de Landau. Sin embargo, sus ideas iconoclastas y su carácter rebelde, dada la evolución política y social del país, lo colocaron en el punto de mira de la ortodoxia soviética.

Landau volvió a la URSS después de año y medio de ausencia, lleno de ideas y planes de futuro. Reanudó las reuniones y actividades con los tres mosqueteros, que se encontraban en una situación semejante a la suya: trabajaban como investigadores en el LFTI y tenían contratos docentes a tiempo parcial. Landau y Bronstein daban sus clases en el Instituto Politécnico, y Gamow e Ivanenko en la Universidad de Leningrado.

La situación general en el país estaba cambiando mucho, sobre todo como consecuencia del Primer Plan Quinquenal, iniciado en 1928 y mediante el cual se buscaba impulsar una economía de estado, completamente centralizada, basada en la colectivización de la agricultura y una industrialización a marchas forzadas. Se acabó el trato especial que se daba a los «especialistas burgueses» en los primeros años de la revolución, la guerra civil y los años de luchas políticas. No era necesaria su colaboración, porque ya se contaba con «especialistas rojos»: ingenieros, científicos, médicos e intelectuales que se habían formado en la década anterior y que apoyaban la política comunista. Muchos científicos relevantes antes de la revolución se encontraban en una posición insegura por ser considerados «burgueses». Las autoridades, la policía, sus propios colegas o sus estudiantes podían acusarlos de crímenes políticos. Un error en su trabajo o no mostrar suficiente celo podía bastar para ser acusados de sabo-

taje. No fue el caso de Abram Ioffe, quien fue considerado como un científico prosoviético, y desde el primer momento gozó del apoyo y la protección del Ministerio de Educación y, sobre todo, del superministerio económico, el Consejo Estatal de Economía. El plan quinquenal hizo de este Consejo la principal autoridad en política científica, y Ioffe se convirtió en uno de sus más preciados asesores. La industrialización masiva del país pasaba por un apoyo decidido a la ciencia y a la ingeniería, lo que significaba un incremento sustancial del número de puestos de trabajo e instituciones relacionadas con la investigación. Como respuesta al plan quinquenal, Ioffe puso como ejemplo su propio Instituto, y aconsejó al Gobierno que se crearan otros semejantes en todo el país.

En el LFTI, Ioffe impulsó una línea de investigación específica para contribuir al desarrollo industrial. Su idea era fabricar películas muy delgadas de aislante eléctrico con el fin de reducir los enormes costos ligados al transporte de la energía eléctrica. El proyecto recibió una financiación considerable y en él se implicó la empresa alemana Siemens. Los primeros resultados obtenidos en Berlín eran positivos, dato destacado en grandes titulares por los periódicos. Incluso fue anunciado por el presidente del Consejo Estatal de Economía en el XVI Congreso del Partido Comunista, celebrado en junio de 1930. Sin embargo, los experimentos en Leningrado no conseguían reproducir los de Berlín. Este era el tema dominante de las discusiones en el LFTI cuando Landau regresó de su larga ausencia. Enseguida se dio cuenta de que la idea de Ioffe se basaba en hipótesis incorrectas, y así lo publicó en una revista científica («Sobre la teoría de la descarga eléctrica de A. Ioffe»). Además, Landau lo proclamaba allá donde iba y ridiculizaba a Ioffe con frases del estilo «la física teórica es una ciencia difícil y no todos están en condiciones de entenderla». Lo cierto es que las medidas preliminares habían sido poco rigurosas, y Ioffe tuvo que acudir al XVII Congreso del Partido Comunista para reconocer que el proyecto no había dado los resultados esperados. Landau tenía razón en lo que se refiere a la valoración física del problema, pero su comportamiento en este incidente no fue muy apreciado por Ioffe ni por otros colegas.

Landau estaba convencido de que había que desarrollar la física teórica como una disciplina separada y para ello impulsó algunas iniciativas institucionales. Su estrategia pasaba por aprovechar el reconocimiento internacional de Gamow, famoso por su teoría de la desintegración nuclear de 1928. Hizo dos propuestas ante la Academia de Ciencias: que Gamow fuera elegido miembro y que se creara un Instituto de Física Teórica, separado del Instituto Físico-Matemático de la propia Academia, y cuyo director fuera el mismo Gamow. Pero esta segunda propuesta estaba mal concebida y era inoportuna. Por un lado, no hacía ninguna alusión a Frenkel, que había sido el primer físico teórico elegido como miembro correspondiente de la Academia de Ciencias en 1929, además de trabajar con ahínco para que los jóvenes físicos teóricos, como el propio Landau, tuvieran la oportunidad de viajar a centros extranjeros. Pero en la mente supercrítica de Landau, el «viejo» Frenkel no daba la talla como físico, lo cual era bastante injusto. Por otro lado, el aire de los tiempos hacía que se considerara inútil la «ciencia pura», lo que a ojos de muchos dirigentes políticos incluía a la física teórica. Esta segunda propuesta, tal vez la que realmente importaba a Landau, no prosperó. Académicos como Ioffe o Rozhdestvenski estaban de acuerdo en que la Academia debía tener un gran instituto de física, pero en él los físicos teóricos debían dedicarse a las cuestiones que interesaban a los experimentales. En cuanto a la primera propuesta, Gamow fue elegido, junto con Fock, como miembros correspondientes de la Academia en 1932.

Los recelos a la física teórica no eran exclusivos de los políticos. También los filósofos marxistas tenían sus objeciones, porque en su opinión, la física moderna había caído en un peligroso idealismo. Las probabilidades cuánticas, el principio de incertidumbre y otras conclusiones de la física cuántica se veían como una negación del determinismo en el mundo macroscópico. Ya hemos visto que Landau se consideraba marxista, pero sus opiniones no tenían nada de conformistas. Consideraba que el materialismo dialéctico era un completo absurdo y no se privaba de decirlo siempre que tenía ocasión de hacerlo. La evolución de la sociedad soviética hacía que este tipo de actitud resultara cada vez más peligrosa, como muestra el episodio que se relata a continuación.

PROBLEMAS CON LAS AUTORIDADES COMUNISTAS

En la biblioteca donde se reunían Landau y sus amigos, se recibía la *Gran Enciclopedia Soviética*, cuya publicación se había iniciado en 1929. Cuando leyeron la entrada sobre el éter reaccionaron enseguida. Había sido escrita por Boris Hessen (también transcrito como Gessen), que entonces era decano de la Facultad de Física de Moscú. Físico de formación, su actividad principal era la filosofía y la historia de la ciencia. Hessen atribuía al éter una realidad objetiva y criticaba que fuera considerado como una materia continua. Afirmaba también que negar la existencia del éter lleva a conclusiones «agnósticas e idealistas». Landau y sus amigos no quisieron desaprovechar esta oportunidad para burlarse de una autoridad académica. Enviaron un telegrama a Hessen, dirigido al supuesto «Departamento del Conocimiento Exacto» con el siguiente texto: «Leída su entrada sobre el éter hemos empezado a estudiarla con entusiasmo. Esperamos hacer pronto la lectura sobre el flogisto». Fue firmado por Landau, Bronstein, Gamow e Ivanenko, más dos estudiantes que en ese momento estaban en la biblioteca y quisieron adherirse a la burla.

Para entender mejor las intenciones de los firmantes, hay que hacer un breve paréntesis sobre el flogisto y el éter. Entre 1667 y 1760 se pensaba que en el proceso de la combustión se emitía una hipotética sustancia, llamada *flogisto*, por lo que los cuerpos perderían masa al arder. Sin embargo, las cuidadosas medidas realizadas por Lavoisier con plomo, estaño y azufre mostraron que, al contrario, los residuos de la combustión tenían una masa mayor. Más tarde se entendió que las sustancias incorporan oxígeno del aire al arder. La teoría del flogisto quedó sin fundamento empírico y fue abandonada. En cuanto a la idea del éter, considerada ya desde la Antigüedad griega, fue planteada en otros términos a lo largo del siglo XIX. Una vez aceptada la naturaleza ondulatoria de la luz, cobró fuerza la idea de que, como toda onda, debe propagarse en un medio material, al que se dio el nombre de *éter luminífero* o simplemente *éter*. Debía llenar todo el espacio, ser muy tenue para no frenar el movimiento de los planetas, y tener otras propiedades bastante curiosas. También se pensó que el éter sería

un sistema de referencia absoluto, algo que estaba implícito en la física clásica. Se llevaron a cabo experimentos para intentar detectar el movimiento relativo de la Tierra respecto al éter, que culminaron con el famoso experimento de Michelson y Morley, realizado en 1887, con resultado negativo. Más tarde, la teoría de la relatividad especial de Einstein estableció la imposibilidad de detectar un movimiento absoluto, lo que hizo innecesaria la hipótesis del éter. Sin embargo, la idea del éter fue debatida durante mucho tiempo por científicos como Lorentz, Poincaré o el propio Einstein, sin que por ello se dudara de la validez de la teoría de la relatividad. A este respecto hay que decir que la cuestión del vacío es más complicada de lo que parece a primera vista, y en la física actual se consideran a veces propiedades del espacio que, de alguna manera, se podrían asociar a un éter.

En una versión muy reduccionista de la historia, se suele presentar la hipótesis fallida del flogisto como un ejemplo evidente de teoría no científica, y la hipótesis innecesaria del éter como una prueba inequívoca de su inexistencia. Landau y sus amigos no supieron, o no quisieron, entrar en más consideraciones, que sin duda veían como sutilezas de filósofo. Estaban entusiasmados con la oportunidad de llamar ignorante a Hessen y despreciar su artículo y con él toda la filosofía oficial. Pero esta reaccionó a través de la Academia Comunista. Pocas semanas después del sarcástico telegrama, los firmantes fueron convocados a una sesión de censura pública en el LFTI, por su comportamiento antisocial. Sus contratos de docencia a tiempo parcial fueron anulados, para evitar que propagaran el «idealismo filosófico» entre los jóvenes. Los dos estudiantes que firmaron el telegrama fueron expulsados de la universidad.

Ioffe estaba furioso con esta burla, porque Hessen era uno de los más firmes defensores de los físicos entre los filósofos. La ortodoxia marxista oficial quería dirigir el desarrollo de la ciencia, tomando como inspiración el libro de Engels *Anti Dühring*, de 1878, y el libro de Lenin *Materialismo y empiriocriticismo*, de 1909. Para celebrar el 25° aniversario de la publicación de este último, tuvo lugar en Moscú una jornada de debate sobre la física moderna. Muchos filósofos y cierto número de físicos rechazaban la re-

latividad y la física cuántica por ser idealistas y burguesas. Hessen sostenía, por el contrario, que los resultados de la física moderna confirmaban la validez del materialismo dialéctico en su análisis de la naturaleza. Además, defendía que correspondía a los físicos, y no a los filósofos, decidir sobre qué hechos son relevantes para la física, sobre si una magnitud física es observable o no. Ioffe, presente en esta reunión, devolvió el argumento del idealismo a los acusadores:

> La certeza *a priori* del camarada Maksimov respecto a la física teórica y su rechazo a las bases experimentales, eso es idealismo, a menos que sea una ignorancia ingenua del contexto de la cuestión.

Este tipo de discusiones fueron muy frecuentes en la URSS, al menos hasta la década de 1960, y en ocasiones con consecuencias dramáticas para algunos de sus protagonistas.

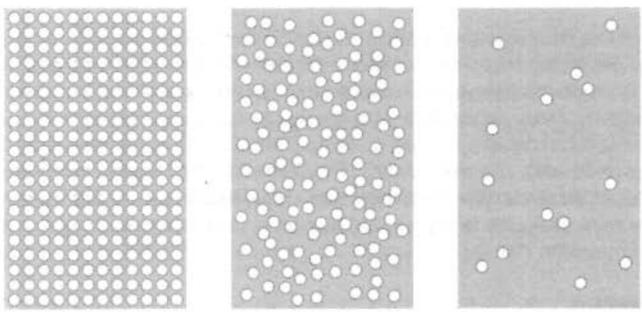
Se entiende así que las relaciones de Ioffe con Landau se hicieran cada vez más tensas. Este aprovechó la oportunidad, propiciada por el mismo Ioffe, de trasladarse al Instituto Físico-Técnico de Ucrania. En agosto de 1932 viajó a Járkov, la capital de Ucrania hasta que en 1934 pasó a serlo Kiev. Antes de seguir este viaje, vamos a referirnos a algunos de los problemas físicos que concentraron la atención de Landau en los siguientes años.

LOS ESTADOS DE LA MATERIA

La materia se presenta en tres estados: sólido, líquido y gaseoso. Si no se varían las condiciones físicas, un sólido conserva su volumen y su forma, un líquido solo conserva su volumen y se adapta a la forma del recipiente que lo contiene, mientras que un gas no tiene ni volumen ni forma fijos. Una misma sustancia puede existir en cualquiera de estos estados, según las condiciones de presión y temperatura. Por ejemplo, el agua sale de un grifo en estado líquido pero, si se calienta en un cazo puede pasar al estado gaseoso, y si se enfría en un congelador puede convertirse en un sólido.

UNA ESTRUCTURA PARA CADA ESTADO

Los tres estados posibles de la materia difieren en su estructura, como se ilustra en las figuras. Cada punto simboliza un constituyente (átomo, molécula o ión) de la sustancia considerada. En un sólido, los constituyentes solo efectúan pequeñas vibraciones en torno a posiciones fijas de una red, regular o no. La fase sólida no implica necesariamente la existencia de regularidad, aunque lo recíproco es falso. En un líquido, los constituyentes se mueven por todo el volumen, pero las distancias medias son comparables a las del sólido. Por eso la densidad de una misma sustancia en estado sólido o líquido no varía mucho. Sin embargo, en el estado sólido un constituyente dado tiene siempre los mismos vecinos, mientras que en un líquido no, aunque en promedio su número sea siempre el mismo. En cuanto al gas, las partículas están a distancias mucho mayores, y poseen una velocidad tal que pueden desplazarse casi libremente, sin sentir las interacciones con las demás.



Sólido Líquido Gas

En este ejemplo solo se ha variado la temperatura, pues el cazo está abierto y la presión es la del ambiente. Pero la presión juega un papel importante, como lo muestran las ollas a presión. La cocción de los alimentos es más rápida si se mantiene la presión a un valor mayor que la atmosférica, porque entonces el agua hierve a más de los 100 °C usuales.

En vez de hablar de los estados de la materia es preferible hablar de sus fases, porque este concepto engloba una noción más general. Por ejemplo, un material magnético se comporta o no como un imán según sea la temperatura, aunque siempre esté en estado sólido. Por ello se habla de dos fases, magnética o no mag-

nética, cuyas diferentes propiedades son bastante claras. De manera general, el término de fase caracteriza una disposición particular de los constituyentes de un sistema.

En general, las transiciones o cambios de fase se estudian variando a la vez la presión y la temperatura, y se llama *diagrama de fases* a la figura resultante. Las curvas unen los distintos valores de presión y temperatura en los que dos fases coexisten. Las tres fases coinciden en un único punto, con valores fijos de presión y temperatura característicos de cada sustancia. Todas las sustancias poseen un punto triple, con la excepción del helio, como veremos pronto.

DIAGRAMA DE FASES

En la figura se muestra una representación esquemática del diagrama de fases del agua. Hay tres regiones distintas donde está en estado sólido, líquido o gas, según sean los valores de la presión y de la temperatura. Las curvas unen los distintos valores de presión y temperatura en los que dos fases coexisten. Así, si se hierve el agua a la presión atmosférica, el líquido y el vapor (las fases líquida y gaseosa) coexisten al alcanzar los 100 °C, y esta temperatura se mantiene, a pesar de que se comunique calor, hasta que se completa la transición de fase. Durante la transición, hay un brusco cambio de volumen debido a la expansión del vapor.

Punto triple

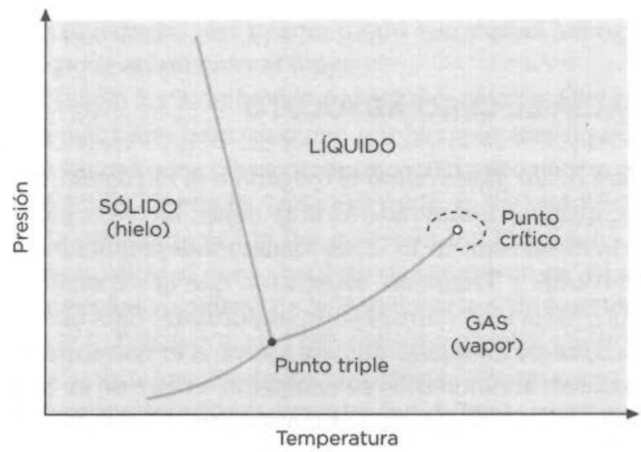
Hay dos puntos destacables en este diagrama. En primer lugar, el punto triple, llamado así porque en él coexisten las tres fases. En el caso del agua, este punto corresponde a una temperatura de 0,007 °C y a una presión de 616,13 Pa (apenas un 1% de la presión atmosférica normal). En el punto triple, el agua está simultáneamente en las fases de sólido, líquido y vapor. Una pequeña variación de la presión y la temperatura en torno a esos valores hace que toda el agua pase a una de las tres fases. Todas las sustancias poseen un punto triple, con la excepción del helio.

Punto crítico

El otro punto a destacar es el llamado *punto crítico*, que corresponde a una temperatura de 373,9 °C y una presión de 22,06 MPa (unas 220 veces la presión atmosférica). A temperaturas superiores a la crítica se pierde la distinción entre fases líquida y gaseosa, y se puede decir que el agua es o un gas muy denso o un líquido poco denso. Se puede cambiar de una fase a la otra sin atravesar la línea de cambio de fase, simplemente rodeando el punto crítico,

A lo largo del siglo XIX, físicos y químicos mostraron un creciente interés por caracterizar los tres estados de las sustancias elementales conocidas. Para muchos científicos el nombre de Michael Faraday (1791-1867) se asocia a sus trabajos sobre el electromagnetismo, electroquímica y óptica. En cambio, sus trabajos para licuar los gases son menos conocidos. Su método consistía en comprimir un gas hasta lograr su condensación a la fase líquida. De este modo consiguió en 1823 licuar cloro, que hasta entonces solo se conocía en estado gaseoso. Su método funcionó con muchos gases, pero no con todos. Faraday denominó *gases perma-*

tal como se indica con la línea de puntos. La línea de coexistencia entre las fases sólida y líquida es casi una recta que se inclina hacia la derecha en la mayoría de las sustancias. En el caso del agua, esta inclinación es hacia la izquierda, lo que tiene que ver con el hecho de que la densidad del hielo es menor que la del agua líquida. Para dar los valores de la presión se ha usado la unidad estándar en física: el pascal (Pa). Esta unidad se queda pequeña en muchas situaciones, y entonces se usan sus múltiplos, como kilo (10^3) o Mega (10^6), o la unidad llamaba bar, que equivale a 10^5 Pa. Así, la presión atmosférica normal es de 101,325 kPa, o de 1,01325 bar.



nentes a aquellos que no podía licuar por compresión. Entre ellos estaban el oxígeno, el nitrógeno y el hidrógeno. A ellos se podrían añadir otros gases que aún no habían sido descubiertos en la época de Faraday, como el flúor (descubierto en 1886) y los gases nobles (1895-1898), pero en la actualidad la lista de gases permanentes tiene solo interés histórico.

Un vistazo al diagrama de fases permite entender por qué hay casos en los que la compresión no es suficiente para licuar un gas. El método de Faraday funciona si el gas se encuentra por debajo del punto crítico. Si este se encuentra a una temperatura mayor que la del punto crítico, por mucho que se comprima no se cruzará la línea de separación de fases. Para el cloro, el punto crítico corresponde a una temperatura de 144 °C y una presión de 77 bar. En este caso, a temperatura ambiente se puede atravesar la línea gas-líquido con un aumento de la presión. Para otras sustancias, la temperatura crítica es menor que la ambiente, por lo que hay que enfriarlas antes de comprimirlas. En el caso de los gases permanentes, esta temperatura es bajísima. La licuefacción de estos gases abrió el camino a la criogenia, disciplina que se ocupa tanto del estudio de los fenómenos y propiedades de la materia a muy bajas temperaturas como de los métodos y técnicas para alcanzarlas, típicamente por debajo de 120 K.

HACIA EL CERO ABSOLUTO

Para licuar gases como el oxígeno o el nitrógeno, había que llegar a conseguir temperaturas muy bajas. La clave para ello ya había sido observada en 1852, de manera independiente, por los británicos Joule y Thomson. Mostraron que la expansión rápida de un gas produce un enfriamiento importante. Esta observación está al alcance de cualquier ciclista atento a lo que sucede con sus neumáticos: al hincharlos se comprime el aire en su interior y se produce un calentamiento, mientas que al deshincharlos, el aire se expande rápidamente y se produce un enfriamiento. La mayoría de refrigeradores y aparatos de aire acondicionado domésticos se

basan en este principio, llamado efecto Joule-Thomson, y usan la compresión y expansión de un fluido refrigerante adecuado.

El oxígeno fue el primero de estos gases que fue licuado mediante una expansión. Lo lograron en 1877, también de forma independiente, el francés Louis P. Cailletet y el suizo Raoul Pictet. Sus resultados fueron presentados en la misma sesión de la Academia de Ciencias de París, lo que no dejó de suscitar un debate sobre la prioridad del descubrimiento. Aunque los diseños detallados eran diferentes, en ambos casos se enfriaba oxígeno muy comprimido, y luego se expandía rápidamente al aire libre. Se producía así una niebla muy espesa, identificada con «un vapor muy próximo a su punto de licuefacción», en palabras de Cailletet. Con este mismo procedimiento, Cailletet consiguió también la licuefacción del nitrógeno pocos meses después.

Con los dispositivos de Cailletet y de Pictet no se podía guardar el oxígeno líquido producido. Los polacos Zygmunt F. Wróblewski y Karol Olszewski lograron hacerlo por primera vez. Modificaron el aparato de Cailletet para que el oxígeno se expandiera en un tubo cerrado, en vez de hacerlo en el aire libre. Una de las extremidades del tubo estaba en un baño de etileno a presión reducida, lo que bajaba su temperatura a unos 140 K. De este modo consiguieron guardar unos pocos mililitros de oxígeno líquido, a una temperatura que estimaron en 55 K. En el tubo de ensayo se podía ver hervir el oxígeno, del mismo modo que vemos hervir el agua cuando se pone en un cazo al fuego.

A finales del siglo XIX la industria necesitaba alcanzar temperaturas cada vez más bajas para producir, por ejemplo, aire líquido. Se desarrollaron así métodos criogénicos muy eficientes para aprovechar el efecto Joule-Thomson. La nueva meta de los científicos implicados en la criogenia era la licuefacción del hidrógeno, y acercarse lo más posible al cero absoluto de temperatura. El escocés James Dewar era miembro de la Royal Society de Londres, entidad que desde su fundación en 1799, organiza charlas públicas semanales para divulgar los resultados científicos más interesantes del momento. Dewar adquirió un aparato de Cailletet para licuar oxígeno en sus charlas, pero era muy difícil que los asistentes pudieran ver cómo hervía. Para ello necesitaba producir y guardar

LA ESCALA ABSOLUTA DE TEMPERATURA



Lord Kelvin, título nobiliario con el que se conoce al físico y matemático británico William Thomson.

Nada se opone en principio a alcanzar temperaturas tan altas como se quiera. Por ejemplo, en las estrellas la temperatura puede variar desde unos miles hasta miles de millones de grados. En el siglo XVIII surgió la idea de un límite inferior de temperatura. Los franceses Charles, Gay-Lussac y el británico Thomson sentaron las bases, ya en el siglo XIX, para una escala absoluta de temperatura, cuya unidad es el kelvin (expresado con el símbolo K). La temperatura refleja la agitación de los constituyentes del sistema, y es proporcional a la energía cinética media. Cuando se disminuye la temperatura, se observa que los constituyentes de toda sustancia, en cualquiera de sus fases, pierden energía a un ritmo constante. A temperatura nula, toda agitación debería desaparecer y el sistema debería alcanzar un estado de reposo absoluto. Las extrapolaciones experimentales y las consideraciones teóricas coincidieron en que esto sucedería al alcanzar los 273,16 °C bajo cero. Este valor (redondeado aquí a dos cifras decimales) es el llamado *cero absoluto*, a partir del cual se define la escala absoluta de temperatura, que se mide en kelvin. La relación entre las escalas absoluta y centígrada es muy sencilla: $T(K) = T(°C) + 273{,}16$.

Energía de punto cero

La escala absoluta de temperatura es independiente de las propiedades de cualquier sustancia. De acuerdo con el segundo principio de la termodinámica, el cero absoluto es inalcanzable en un número finito de pasos. En el proceso de enfriamiento de gases atómicos mediante láseres para producir condensados de Bose-Einstein se han frenado los átomos hasta alcanzar energías cinéticas pequeñísimas, correspondientes a temperaturas absolutas del orden del nanokelvin (10^{-9} K o milmillonésima de kelvin). Según la física clásica, el cero absoluto corresponde a la temperatura en la que los constituyentes de una sustancia permanecen estrictamente inmóviles, por tanto, en estado sólido. Pero la física cuántica muestra que no es así, pues existe una energía, llamada de *punto cero*, relacionada con el principio de incertidumbre: cuanto mayor sea la localización de una partícula, mayor será la indeterminación de su momento y, por consiguiente, de su energía cinética.

una cantidad mayor de la que se conseguía en el aparato de Cailletet, y se le ocurrió construir un dispositivo especial. Se trataba de dos tubos de diámetro distinto, de forma que uno de ellos puede meterse dentro del otro para luego hacer el vacío en el tubo exterior y reducir así los intercambios térmicos entre el líquido contenido en el tubo interior y el exterior. El dispositivo se puede mejorar con un recubrimiento plateado en las paredes interiores de los tubos, que refleja la radiación térmica. En los laboratorios se llama *vaso Dewar* a este artefacto, pero en la vida corriente se conoce como «termo». Su protección exterior no permite ver que se trata de un doble tubo.

En 1898, Dewar consiguió producir y almacenar unos 20 mililitros de hidrógeno líquido. Estimó que había alcanzado una temperatura en torno a los 20 K. Pocos meses después llegó a los 14 K y obtuvo hidrógeno en estado sólido. Dewar pensó que con el hidrógeno líquido producido podría licuar el helio, un gas que había sido descubierto en la Tierra en 1895. A pesar de sus esfuerzos, no lo consiguió, como tampoco lo consiguieron otros científicos, y por eso se pensaba que el helio podría ser el único gas permanente. Sin embargo, en 1908 el neerlandés Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926), tras enfriar el gas hasta una temperatura de unos 5 K, logró licuar por primera vez el helio. Cuando poco tiempo después logró alcanzar la temperatura de 0,9 K se decía que su laboratorio era el punto más frío de la Tierra. Podía haberse dicho que también lo era del universo, cuya temperatura media es de unos 2,7 K, pero en aquellos años no se conocían algunas de sus propiedades a gran escala.

EL LABORATORIO CRIOGÉNICO DE LEIDEN

En 1882, Heike Kamerlingh Onnes fue nombrado catedrático de Física Experimental y Meteorología en la Universidad de Leiden. En su lección inaugural se refirió a la necesidad de la investigación cuantitativa, basada en medidas físicas muy precisas. En ella acuñó su lema *Door meten tot weten*, pareado en neerlandés que se puede traducir como «al conocimiento por la medida». Se propuso

un programa de investigación a largo plazo para verificar la ecuación de Johannes van der Waals sobre los gases reales. Como esta ecuación coincide con la de los gases ideales a altas temperaturas, esperaba que sus límites de validez aparecerían en el extremo de las temperaturas bajas. Kamerlingh Onnes reorganizó el laboratorio para convertirlo en el primer laboratorio de física dedicado a la criogenia. No fue fácil, y no solo por razones técnicas. En 1896 se produjo una gran alarma entre la población de Leiden cuando se supo que Kamerlingh Onnes había almacenado una gran cantidad de hidrógeno comprimido. Los habitantes aún recordaban la gran explosión de municiones que se produjo durante la ocupación de Napoleón. El laboratorio de Leiden permaneció cerrado un par de años, hasta que se verificó su seguridad.

Kamerlingh Onnes consiguió apoyo financiero de varios industriales neerlandeses y logró un conjunto de instalaciones, material y personal que durante mucho tiempo fueron únicos en su género. También impuso una organización muy estricta, con exigencias de calidad muy altas. Promovió la creación de una escuela de formación de técnicos y artesanos, como sopladores de vidrio o instrumentistas, que fueron de gran utilidad para su laboratorio y para la industria neerlandesa. En opinión de muchos historiadores, el Laboratorio Criogénico de Leiden es el primer ejemplo de lo que años después se llamó *Big Science*, la ciencia «mastodóntica» podríamos decir, uno de cuyos ejemplos actuales más conocidos lo constituye la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN), con su laboratorio de física de partículas instalado en Ginebra, Suiza.

Cuando en 1908 se propuso intentar la licuefacción del helio, Kamerlingh Onnes disponía de las mejores instalaciones existentes y de un personal técnico muy eficiente. Por ejemplo, en solo una hora podía producir unos 4 litros de hidrógeno. No había duda de que si el helio podía ser licuado, Leiden era el lugar adecuado para hacerlo. Además, para esta empresa tenía una ventaja sobre otros científicos, pues su hermano era el director de la oficina neerlandesa de información comercial. Gracias a sus contactos, consiguió en 1905 una gran cantidad de arenas de monacita, extraídas en Carolina del Norte (Estados Unidos). Este mineral es una mezcla de

fosfatos de diversas tierras raras (cesio, lantano, neodimio, samario...) que contiene torio. Este elemento radiactivo emite partículas alfa, que no son más que núcleos de helio. En un proceso lento, al calentar el mineral se desprende el helio gaseoso atrapado en su interior. Al cabo de tres años, Kamerlingh Onnes disponía de unos 300 litros de helio. Además, disponía de unos 1 000 litros de aire líquido en su laboratorio, suficiente para iniciar el proceso de enfriamiento en cascada.

«La superficie del líquido contra el cristal es tan neta como el filo de una navaja.»

— Heike Kamerlingh Onnes, tras conseguir helio líquido por primera vez.

El experimento empezó a las 5.45 h del 10 de julio, y la expectativa suscitada hizo que por la tarde el laboratorio se llenara de colegas deseosos de conocer el resultado. El procedimiento era una sucesión de enfriamientos y evaporaciones para conseguir temperaturas cada vez más bajas. Empezó con la producción de 75 litros de nitrógeno líquido, lo que permitió obtener 20 litros de hidrógeno con los que iniciar la licuefacción del helio. Pero después de casi 14 horas, no había señales de helio líquido y parecía que habría que dejarlo para mejor ocasión. La temperatura no bajaba de 4,2 K, y uno de los asistentes sugirió que tal vez esa fuera la señal de que se estaba licuando el helio. Afortunadamente, el dispositivo tenía una pequeña ventana de observación y se confirmó la sugerencia. Kamerlingh Onnes pudo ver claramente la interfase de separación entre el líquido y el gas. Había conseguido unos 60 cm^3 de helio líquido. Más tarde consiguió reducir la presión sobre la superficie del helio líquido y llegó a 1 K, pero no pudo solidificar el helio. Hoy sabemos que para ello hay que aumentar al mismo tiempo la presión hasta unas 24 atmósferas. Mejoró su equipo, y en 1908 podía producir unos dos litros por hora, que guardaba en un criostato adecuado, para poder hacer experimentos sobre materiales a bajas temperaturas. Kamerlingh Onnes recibió el premio Nobel de Física en 1913 «por sus investigaciones sobre las propiedades de la materia a bajas temperaturas, lo que llevó, entre otras cosas, a la producción de helio líquido».

A la presión atmosférica, las temperaturas de ebullición de los elementos antes mencionados son cada vez más bajas: oxígeno 90 K, nitrógeno 77 K, hidrógeno 20 K, y helio 4,2 K. El valor tan bajo en el caso del helio se explicó por el carácter inerte de sus átomos. El helio es el más ligero y más inerte de los llamados *gases nobles*. Para cualquier sustancia, los valores de los puntos de ebullición y de fusión resultan de un balance entre las fuerzas de atracción entre los átomos o las moléculas de la sustancia y su agitación térmica, que es consecuencia de la temperatura. Por tanto, cuanto menor sea la interacción entre los átomos, menor será la temperatura necesaria para que la interacción iguale o domine a la agitación térmica. Pero esta explicación ignora los efectos cuánticos. Incluso en el cero absoluto, los átomos se mueven debido al fenómeno cuántico denominado *movimiento de punto cero*. Volveremos sobre ello en el capítulo siguiente, pero de momento es importante retener que para explicar las propiedades del helio a temperaturas de unos pocos kelvin, es indispensable recurrir a la física cuántica. Por eso se dice que el helio líquido es un «líquido cuántico».

Las bajas temperaturas que se podían alcanzar en Leiden no solo hicieron que este laboratorio tuviera prácticamente el monopolio de producción de helio líquido durante una buena decena de años. También permitieron hacer investigaciones en el estudio de las propiedades ópticas, eléctricas y magnéticas de la materia a muy bajas temperaturas. Leiden fue también el centro de formación ineludible para quienes querían iniciarse en las bajas temperaturas, entre los que cabe destacar al matrimonio formado por los físicos rusos Lev V. Shubnikov (1901-1937) y Olga N. Trapeznikova (1901-1997). Estuvieron en Leiden entre 1926 y 1930, y a su regreso a la URSS tuvieron un papel importante en las etapas iniciales del Instituto Físico-Técnico de Ucrania.

LANDAU EN UCRANIA

El Instituto Físico-Técnico de Ucrania (UFTI; *Ukraisnkii Fiziko-Tekhnicheskii Institut*) fue uno de los primeros institutos promo-



Lev Landau en una fotografía de 1929.

vidos por el Consejo Estatal de Economía siguiendo la propuesta de Ioffe. El grueso del personal científico del UFTI, al menos del que debía asumir responsabilidades importantes, provenía del instituto de Ioffe. Como anécdota, cuando estos físicos tomaron el tren hacia Járkov, fueron despedidos en la estación de Leningrado con discursos y banda de música, pues se consideraba que este traslado era muestra de su gran patriotismo. Lo cierto es que para muchos de ellos el UFTI significaba una oportunidad clara para poder desarrollar sus proyectos, sin sentir tan de cerca la autoridad de Ioffe. En el UFTI también se integraron algunos científicos extranjeros que, por razones diversas, emigraron a la URSS, como el alemán Friedrich Houtermans (1903-1966) y el austriaco Alexis Weissberg (1901-1964), de quienes volveremos a hablar.

Los nuevos institutos físico-técnicos dependían de los recursos financieros y materiales del Ministerio de Industria Pesada, que presionaba para que produjeran resultados con aplicaciones industriales. La tónica general era despreciar «la ciencia por la ciencia». La investigación teórica se veía como una actividad abstracta y sin utilidad, y se defendía en cambio una investigación aplicada que produjera resultados inmediatos, con aplicaciones industriales. Por su parte, los científicos se esforzaban en convencer a los funcionarios del ministerio de que la investigación fundamental tiene también un potencial industrial directo. Parece ser una constante, en el tiempo y en el espacio, que muchos políticos hagan una distinción miope entre investigación básica y aplicada, dando prioridad absoluta a la segunda para obtener resultados inmediatos, y que los científicos empleen mucho tiempo en convencer a los políticos de que en asuntos científicos hay que tener miras a largo plazo.

La investigación en el UFTI se dedicó básicamente a dos grandes temas: las bajas temperaturas y la física nuclear. El primero incluía el estudio de las propiedades de materiales a bajas temperaturas, y no parece que fuera difícil convencer a las autoridades de su importancia. Lev Shubnikov instaló el primer licuefactor de helio de la URSS, y prosiguió los trabajos iniciados durante su estancia en Leiden, que le habían valido el reconocimiento internacional, entre otras razones por el llamado *efecto*

Shubnikov-Haas. En cuanto a la incipiente física nuclear, aunque no se le veían aplicaciones inmediatas, se consideraba que era una investigación que daba prestigio internacional a la ciencia soviética. El UFTI se convirtió en un referente soviético en física nuclear tras la construcción del primer acelerador de partículas. A principios de 1932, los británicos John Cockroft y Ernest T.S. Walton habían conseguido romper el núcleo de litio mediante un haz de protones. En octubre de 1932 se reprodujo este experimento en el UFTI, lo que fue anunciado en la prensa como la primera reacción nuclear soviética. En pocos años, el UFTI creció en tamaño y presupuesto, poniéndose a la altura de su hermano mayor de Leningrado. En 1932, el UFTI empezó a editar una revista científica propia *(Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion)*, que publicaba artículos en alemán, francés e inglés. Enseguida se convirtió en la revista preferida por los científicos soviéticos para dar a conocer internacionalmente sus investigaciones, que dejaron de hacerlo en la alemana *Zeitschrift für Physik*.

El primer director del UFTI, Ivan Obreimov, era consciente de la creciente importancia de la física teórica y se mostró dispuesto a apoyarla desde el primer momento. En 1929, un año antes de la inauguración oficial del UFTI, acogió el primer congreso de física teórica de la URSS. También propuso a Ehrenfest que aceptara un puesto en el instituto para hacerse cargo de la física teórica. Ehrenfest sugirió que le ofrecieran este puesto a Landau, de quien tenía una excelente opinión, a tenor de las palabras escritas en una carta a su amigo Ioffe. Se refería a las discusiones que había tenido con Landau sobre muchas cuestiones de física:

> [...] independientemente de que yo estuviera equivocado (lo que sucedía la mayor parte de las veces en los problemas fundamentales) o tuviera razón (raras veces, siempre sobre aspectos secundarios), con él he aprendido siempre muchísimo.

La sugerencia fue aceptada y Landau se encontró en la situación de crear y dirigir un grupo teórico dentro del UFTI. Tenía completa libertad para organizarlo, para elegir los temas de in-

vestigación y para admitir a los aspirantes que considerase oportunos. Hay que destacar que el UFTI desarrolló y mantuvo los más amplios contactos internacionales. No solo enviaba a sus investigadores a algunos de los centros europeos más avanzados, sino que también recibió las visitas de numerosos científicos extranjeros de prestigio, como Bohr, Dirac, Peierls o Teller, por mencionar solo a físicos teóricos.

Ya hemos visto que el viaje formativo de Landau le motivó para impulsar la física teórica en la URSS, tomando como modelo el instituto de Bohr. Pero nunca se interesó por las cuestiones de principio, tan del gusto de Bohr, porque pensaba que estos eran asuntos filosóficos en los que no había que perder tiempo. La física teórica que defendía Landau estaba muy lejos de esa ciencia por la ciencia, que tanto criticaban los filósofos del régimen, aunque por razones distintas a estos. Lo que buscaba Landau eran problemas concretos que resolver, y por eso tuvo siempre una relación especial con sus colegas experimentales. En Járkov tomó la costumbre de visitarlos casi todos los días, para enterarse del desarrollo de los experimentos que estos realizaban en física nuclear, estado sólido o propiedades de la materia a bajas temperaturas. En el UFTI se celebraba una reunión semanal para que cada grupo informara del estado de sus investigaciones. Además, había un seminario semanal para presentar nuevos resultados o para discutir sobre artículos publicados en revistas científicas recientes. En ambos casos, los amplios conocimientos de Landau y su agudo espíritu crítico hacían de él un elemento imprescindible en las discusiones. Y su puerta estaba siempre abierta para quien quisiera pedirle consejo o discutir algún problema sobre cualquier tema de física. En este sentido, daba prioridad absoluta a los físicos experimentales. Todos sabían que tenía mucha más paciencia y era mucho más amable con ellos que con los físicos teóricos. A estos les exigía mucho más, y si le planteaban algún tema en términos vagos, sin haber reflexionado bastante, o con errores conceptuales de bulto, se convertía en un feroz crítico que no dudaba en ridiculizar a su interlocutor. En uno de sus rasgos de humor, colgó en la puerta de su despacho el aviso: «Cuidado, muerde».

Landau daba clases de física en el Instituto de Mecánica y Construcciones Mecánicas de Járkov, con el objetivo principal de formar a jóvenes físicos para el UFTI. Empezó así a formarse la «escuela de Landau», con unos criterios muy exigentes. Los primeros estudiantes fueron Alexandr Kompaneets, Evgeny Lifshitz, Isaak Pomeranchuk y Aleksandr Akhiezer. Antes de aceptar a un estudiante, Landau lo sometía a una serie de exámenes sobre lo que consideraba el mínimo teórico que todo aspirante a físico debía conocer. Era más bien un mínimo enciclopédico, que englobaba toda la física, como veremos en el último capítulo. Sus estudiantes tenían que aprender física, adquirir las destrezas técnicas necesarias para abordar la solución de problemas concretos y de interés, y ser muy pragmáticos, dejando de lado las cuestiones de fundamentos, tan del gusto de Bohr. A sus primeros estudiantes les sugirió temas de investigación, pero pronto les exigió que fueran autónomos y encontraran por sí mismos temas interesantes.

«Claridad y rigor máximos, y nada superfluo.»

— Aleksandr Akhiezer, sobre Landau como profesor de Física.

El ambiente informal que Landau había vivido en su etapa estudiantil había cambiado a otro muy distinto. A partir de 1934, se restauraron los títulos académicos, que en la universidad eran de tres niveles. Al acabar los estudios, se realizaba el equivalente a una tesis de máster actual. En el nivel siguiente, los aspirantes hacían investigación bajo la dirección de un profesor y escribían una tesis para recibir el título de candidato a doctor, equivalente al doctorado de muchas universidades actuales. Por último, para poder acceder a cargos de catedrático en la universidad, había que realizar investigación independiente y presentarla en forma de otra tesis, lo que daba el título de doctor, semejante a la «Habilitación» que se está generalizando en países europeos. Quienes habían desarrollado sus carreras y alcanzado un nivel profesional durante el período en el que los títulos habían sido abolidos, recibieron los grados académicos basados en los logros acumulados en su inves-

tigación. Landau recibió en 1935 directamente el título de Doctor en Ciencias, sin necesidad de escribir tesis alguna, lo que sin duda fue un alivio para quien siempre tuvo tantas dificultades para escribir cualquier cosa.

Con el título de doctor, fue nombrado catedrático de Física Teórica de la Universidad de Járkov. Hasta ese momento, la física se daba en la asignatura de Física Experimental, con un profesor que no era muy apreciado por los estudiantes. Los contenidos del curso eran una mezcla de leyes y principios físicos y una descripción de diversos aparatos, como era típico de los manuales de física del siglo XIX hasta bien entrado el XX. Landau criticaba este tipo de textos, en los que «las leyes fundamentales de la física se mezclan con las tuercas utilizadas para ensamblar las piezas de un dispositivo». El rector de la universidad le propuso a Landau hacerse cargo de esta asignatura para que los estudiantes tuvieran la formación adecuada previa a los cursos de especialización. Convirtió la asignatura en un curso de Física General, pero bastante especial. Redujo al mínimo el aparato matemático, preocupado ante todo por enseñar los elementos esenciales y las leyes más importantes de la física: principio de mínima acción, principios de conservación de la energía y el momento, simetrías del espacio-tiempo, relatividad especial... Involucró en esta enseñanza a sus jóvenes discípulos, y dejó las demostraciones experimentales a cargo de un asistente en el laboratorio.

En opinión de Akhiezer, era un enseñante nato, sus clases eran magníficas, y a ellas no solo asistían los estudiantes inscritos en el curso, sino también sus colegas Shubnikov y Rozenkevich y todos sus aspirantes. Pero no todos eran favorables a estos métodos. Muchos estudiantes del curso consideraban, con razón, que el nivel era demasiado alto y aún más el nivel de exigencias de Landau. Otros profesores de la universidad no apreciaban su estilo informal ni su desprecio a la filosofía oficial.

Lev Shubnikov desarrolló en el UFTI un floreciente programa experimental sobre superconductividad y otros efectos de bajas temperaturas en los metales. Se hizo muy amigo de Landau, y sus colegas se referían a ellos como «Lev el gordo» y «Lev el flaco». No es que Shubnikov fuera gordo, es que la extrema delgadez de



FOTO SUPERIOR:
En 1929, el UFTI acogió el primer congreso de física teórica de la URSS, al que asistieron dos de sus jóvenes y brillantes científicos, Landau y Gamow (en el centro de la imagen).

FOTO INFERIOR:
Congreso internacional sobre magnetismo celebrado en Járkov en 1931. En el centro de la imagen, un insolente Landau le gasta una broma al científico Nikolai S. Akulov, gesticulando sobre su cabeza en el momento de sacar la instantánea.



Landau hacía parecer gorda a cualquier persona normal que se pusiera a su lado. Landau bromeaba sobre esto diciendo que él no tenía «constitución» sino «destitución» física. Shubnikov descubrió el efecto Meissner, independientemente de este, y fue el primero en mostrar que la inducción magnética en un superconductor es exactamente cero. También descubrió el estado intermedio de los superconductores, cuya teoría fue elaborada por Landau. La estrecha colaboración de Landau con el grupo experimental del UFTI le ayudó a predecir el fenómeno del antiferromagnetismo, y a interesarse en el estudio de la superconductividad. En un material ferromagnético, todos los dipolos magnéticos que lo constituyen están alineados en la misma dirección (figura 1). En los materiales antiferromagnéticos, la mitad de estos dipolos están alineados en una misma dirección, y la otra mitad en la dirección contraria (figura 2). Un material se comporta de una u otra manera según sea la interacción específica entre sus componentes.

LAS TRANSICIONES DE FASE DE SEGUNDO ORDEN

La aportación más importante que hizo Landau a la física durante su período en Járkov fue sin duda su teoría termodinámica de las transiciones de fase de segundo orden. Se trata de cambios de un sistema en los que su estado varía de manera continua, pero su grado de orden o simetría lo hace abruptamente. En una transición hay características concretas que dependen del sistema considerado, como el tipo de constituyentes y sus interacciones mutuas. Landau mostró sin embargo que existen características universales, que se aplican a sistemas físicos muy dispares.

Por ejemplo, entre un volumen de agua a 22 °C y el mismo volumen a 24 °C hay poca diferencia: las moléculas de agua se mueven un poco más rápidamente en el segundo caso, pero existe un cambio continuo al pasar de una temperatura a otra. Sin embargo, el cambio es muy brusco si consideramos las temperaturas de −1 °C y 1 °C, pues el agua pasa de sólido a líquido. Cuando la temperatura alcanza el valor de transición (0 °C en este ejemplo

de la licuefacción, suponiendo presión atmosférica), ambas fases coexisten. Si bien hay que comunicar energía al sistema, la temperatura permanece constante hasta completar la transición, que afecta a todas las moléculas de agua. Lo mismo sucede en el proceso inverso de congelación, o si hubiéramos considerado la vaporización y la condensación, entre 99 °C y 101 °C. A este tipo de transiciones se les llama de *primer orden*. En ellas existe un intercambio de energía (para calentar o enfriar), y hay magnitudes que cambian bruscamente de una a otra fase, como el volumen.

Consideremos ahora un imán. Para fijar ideas, podemos pensar que sus átomos se comportan como pequeñas brújulas, orientadas mayormente en una misma dirección. Si se aumenta la temperatura, lo hace también la agitación de estas brújulas, y cada vez habrá menos que estén orientadas en la dirección inicial y más que lo estén en cualquier dirección. Al llegar al valor de 1 043 K (770 °C), el imán pierde sus propiedades magnéticas porque todos los átomos están orientados al azar (figura 3). Esta temperatura de transición ferromagnética se llama *temperatura de Curie*, en honor de Pierre Curie. En este proceso no se puede hablar en ningún momento de una mezcla de estados (como sólido-líquido o líquido-vapor), en la que se absorbe o cede calor manteniendo constante la temperatura. Antes de alcanzar la temperatura crítica, se puede hablar de un orden, con un número más o menos grande de los imanes magnéticos orientados en una dirección. Después de la temperatura crítica, las orientaciones son aleatorias, se ha perdido dicho orden. Este tipo de transición de fase se denomina de *segundo orden*.

Landau se dio cuenta de que no hace falta conocer los detalles microscópicos de lo que sucede en una transición de fase de segun-

FIGURAS 1 Y 2:
En los materiales ferromagnéticos, todos sus dipolos magnéticos se alinean en la misma dirección, mientras que en los antiferromagnéticos, la mitad se alinean en una dirección, y el resto, en la dirección contraria.

FIGURA 3:
Efecto de la temperatura en un material magnético. El desorden de los átomos hace que las propiedades magnéticas se pierdan.

FIG. 1

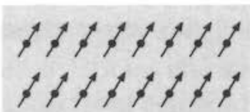
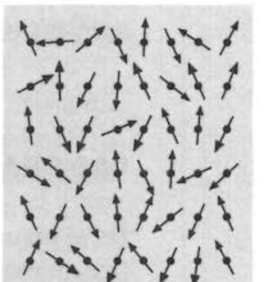


FIG. 2



FIG. 3



do orden, sino que basta razonar en términos de simetrías. Para ello definió un «parámetro de orden», que por definición varía de manera continua entre 0 (desorden completo) y 1 (orden completo). En el caso del imán, este parámetro es la fracción de brújulas atómicas que están orientadas en la misma dirección. No siempre es tan fácil definir el parámetro de orden adecuado, y en general hace falta conocer el proceso en detalle y aplicar buenas dosis de sentido físico. Las propiedades de la transición se estudian analizando la diferencia de energías del sistema en los estados ordenado y desordenado. Ha de ser nula en el momento de la transición de fase, puesto que no hay que comunicar energía para que se produzca. Aquí intervino de nuevo la intuición de Landau: propuso una expresión matemática general en función del parámetro de orden (un desarrollo en serie, para ser precisos), y a continuación analizó qué términos debía considerar. Al final se quedó con una expresión sencilla que dependía de dos parámetros ajustables en función de la transición considerada. De esta expresión de la energía se pueden deducir cantidades termodinámicas (macroscópicas) como la entropía, el calor específico, etcétera, que pueden ser medidas y determinar así los parámetros libres. Volveremos a esta teoría más adelante, cuando hablemos de la superconductividad. Este es un ejemplo de una teoría fenomenológica, en donde se describen propiedades observables de un sistema en términos de unos pocos parámetros ajustables, sin necesidad de conocer la interacción entre los constituyentes. La calidad de la teoría viene dada por las nuevas propiedades que es capaz de predecir y explicar.

LAS GRANDES PURGAS ESTALINISTAS

En el plano sociopolítico, podríamos decir que la sociedad soviética efectuó una transición de fase, desde el estado revolucionario caótico al orden estalinista, y muchos aspectos de la revolución cultural acabaron bruscamente en 1932. Landau efectuó una transición más suave, como si no se diera cuenta de los cambios que se producían en su entorno. Continuó con su desprecio público

por la filosofía oficial, con sus críticas a las autoridades académicas, con su estilo y manera de entender las clases, y todo ello le granjeó un buen número de enemigos.

En 1936 tuvo lugar una reunión especial de la Academia de Ciencias para analizar los resultados del LFTI. Se le reprochaba que se ocupara de «problemas alejados de la realidad», es decir, sin aplicaciones concretas inmediatas. Esto es algo que Ioffe negó, y en su informe mencionó treinta problemas técnicos en los que estaba trabajando el LFTI. Claro que en su empeño por aumentar este número mencionó cosas como pintar de blanco el interior de los edificios para ahorrar electricidad, lo que no puede considerarse como un ejemplo de investigación avanzada, aunque resulte cierto. También se refirió al estado general de la física en la URSS, dando una visión muy optimista. Landau intervino para criticar su excesivo optimismo. Después de reconocer sus méritos en el desarrollo de las ciencias en la URSS y algunos de sus logros científicos personales, criticó en términos muy duros la visión exagerada de Ioffe sobre la situación de la física. Si Ioffe decía que había unos dos mil quinientos físicos en la URSS, Landau replicaba que la mayoría tenían un nivel de ayudantes de laboratorio, sin conocimientos de física reales. Cifró en apenas un centenar el número de físicos dignos de tal nombre, incluyendo en su recuento a los químicos físicos. Criticó el aspecto propagandístico de Ioffe, que en ocasiones presentaba como novedad lo que no era más que verificación de resultados conocidos. Landau no pensaba que, en el ambiente general del país, estas críticas públicas suponían un gran riesgo, tanto para los atacantes como para los atacados.

A medida que la situación internacional empeoró y crecieron las expectativas de una nueva guerra mundial, la ciencia soviética y toda la sociedad empezaron a estar sujetas a una férrea disciplina y a militarizarse. El nuevo director quería reorientar el UFTI hacia la investigación aplicada para usos industriales y militares, con proyectos de carácter secreto. Landau defendió entonces que el instituto debía dividirse en dos, con uno de ellos dedicado exclusivamente a la investigación básica en física. Esta postura fue apoyada por el joven Moissey Koretz en un artículo en el tablón de noticias del instituto, por el que fue detenido y acusado de sa-

botaje contra la actividad militar soviética. Landau intervino ante el jefe del Comisariado del Pueblo para Asuntos Internos (NKVD; *Naródniy komissariat vnútrennij del*) de Ucrania, y Koretz fue liberado poco después «por falta de pruebas». Sin embargo, según se supo en 1991, en su expediente del NKVD figura una nota instando a que no dejara de ser vigilado pues, aunque no se había podido demostrar su culpabilidad, era «miembro de una organización contrarrevolucionaria de sabotaje dirigida por Landau».

Surgió otro conflicto con los estudiantes del curso de Física General, la mayoría de los cuales tenían más de treinta años. Habían sido enviados por el Partido Comunista para que se formaran como técnicos especializados, aunque muchos de ellos no tenían la formación previa que habría sido deseable. No apreciaban el nivel de los cursos ni tampoco las reacciones de Landau ante sus carencias. Este seguía con sus comentarios bruscos e irreverentes, y con un nivel de exigencia muy alto. Las cosas se complicaron cuando en un examen suspendió a más de la mitad del curso. Llegaron quejas al comité universitario del Partido Comunista, al rector e incluso al Ministerio Ucraniano de Educación. Además de las quejas de los estudiantes, salieron a relucir acusaciones de idealismo burgués contra Landau por no aceptar las opiniones de la filosofía oficial sobre la física moderna. En diciembre de 1936, el rector convocó a Landau y le pidió que le presentara por escrito su renuncia, sugiriéndole que adujera cuestiones personales; de lo contrario iniciaría los trámites para cesarlo. Landau se negó, y al salir de la reunión comunicó a sus amigos que estaba a punto de ser despedido. Para presionar al rector, algunos de sus colegas y discípulos presentaron la dimisión de sus puestos docentes, lo que el rector aceptó inmediatamente. En el ambiente generalizado de sospecha, búsqueda de enemigos interiores y de espías, esta dimisión colectiva fue presentada en una asamblea del UFTI como una «huelga antisoviética», que trajo consecuencias fatales para algunos de ellos.

En enero de 1937 se celebró en Járkov un congreso sobre física de bajas temperaturas, cuya conferencia inaugural fue impartida por Landau. Uno de los asistentes a este congreso fue Kapitsa, quien llevaba algún tiempo buscando a un físico teórico para su Instituto de Moscú. Pocos meses antes, ofreció el puesto a Max

Born, entonces exiliado en Inglaterra, pero este ya había aceptado ir a la Universidad de Edimburgo. Landau estaba convencido de que su período en Járkov se había terminado, y que al cese en la universidad le seguiría el cese en el UFTI. Muy posiblemente este asunto salió en las conversaciones entre Landau y Kapitsa, y ambos llegaron a un acuerdo. Landau viajó a Moscú, y envió desde allí una petición formal a Kapitsa para ingresar en su Instituto, al que se incorporó el 16 de marzo. Podemos saber qué opinión tenía Kapitsa de su nuevo fichaje a través de una carta que escribió a Molotov para resolver algunos asuntos administrativos relacionados con el puesto de Landau.

> Es doctor en física y es uno de los físicos teóricos con más talento de la URSS. El objetivo de su incorporación es tratar todos los problemas teóricos que resultan del trabajo experimental en este instituto. La experiencia ha mostrado que la colaboración entre experimentales y teóricos es la mejor manera de asegurar que la teoría no se separe de los experimentos, mientras que al mismo tiempo los resultados experimentales se desarrollan adecuadamente desde la perspectiva teórica, y todos los miembros del equipo científico adquieren una amplia comprensión de ellos.

El traslado de Landau a Moscú solo retrasó el momento de su detención. Entre 1937 y 1938 tuvo lugar la gran purga estalinista. Se inició con el infame decreto 00447 del Politburó firmado el 2 de julio de 1937, en el que se distinguían dos grupos de elementos antisoviéticos en el país. Los más peligrosos debían ser fusilados, y los otros, condenados a diez años de trabajos forzados. Según los historiadores hubo 680 000 fusilamientos y 1 300 000 deportaciones en esta gran purga. A los pocos días de este decreto, el NKVD de Járkov se preparaba para liquidar al «grupo contrarrevolucionario» existente en el UFTI, dirigido por «el profesor trotskista Landau». Las detenciones se habían iniciado meses antes. El austriaco Alexis Weissberg, por ejemplo, había sido detenido en marzo. Según escribió años después, en los interrogatorios le preguntaban por Landau. Uno de sus interrogadores le dijo que este estaba de momento protegido por su reputación internacional

como científico, pero que eso iba a acabar pronto. En el mes de agosto fueron detenidos varios físicos más, entre ellos Shubnikov, que «confesaron» formar parte del grupo subversivo dirigido por Landau. Shubnikov fue condenado a diez años de prisión «sin derecho a correspondencia». Como se supo años después, esta coletilla era el eufemismo habitual para indicar un fusilamiento sin publicidad. En diciembre de 1937 fue detenido el alemán Houtermans. Tras los pactos Molotov-Ribbentrop, fue entregado a la Gestapo, al igual que Weissberg. Estos dos físicos eran de ideas comunistas, y habían emigrado a la URSS para ayudar a construir el socialismo. Weissberg pudo escapar de la prisión y abandonar Alemania. Houtermans fue liberado en Berlín gracias a los esfuerzos de Von Laue y, por sorprendente que parezca, durante los años de la guerra se integró en el proyecto nuclear nazi, en un laboratorio privado financiado en parte por el Ministerio de Correos.

El período de Landau en Járkov fue muy productivo en lo que se refiere a la física. Solo en 1936 hizo trabajos en temas tan variados como efectos fotoeléctricos en semiconductores (con Lifhsitz), teoría de la dispersión y absorción del sonido (con Teller), propiedades de los metales a muy bajas temperaturas (con Pomeranchuck), absorción del sonido en los sólidos (con Rumer), ecuación de transporte con interacción de Coulomb, teoría de las reacciones unimoleculares, teoría del estado intermedio de los superconductores y teoría de las transiciones de fase.

También fue un período importante en lo personal. En 1932 conoció en una fiesta de fin de curso a Concordia Terentievna Drobantseva, «la chica más guapa de la velada». Cora, como era más conocida, estudiaba química y trabajaba al mismo tiempo en la cadena de montaje de una fábrica. Era dos años más joven que Landau, y se acababa de separar de su primer marido. En su época de estudiante en Leningrado, Landau machacaba a sus amigos con sus teorías, sin base empírica alguna, sobre las mujeres y el amor. La fiesta de fin de curso sometió a dura prueba estas teorías, que por fin se confrontaron con la realidad. No sabemos si tuvo que modificarlas o no, pero sí que al cabo de unos meses iniciaron una relación que duró toda su vida. Dado el carácter y las ideas de Landau, este matrimonio tuvo muy poco de convencional.

CAPÍTULO 3

El líquido superfluido

Una corriente líquida que fluye sin necesidad de aplicarle una presión, incluso por un finísimo capilar, sin que nada la frene. Una corriente eléctrica que no necesita batería o fuente de alimentación para mantenerse. Se trata de los fenómenos cuánticos de la superfluidez y de la superconductividad. Con su gran intuición física, Landau sentó las bases teóricas para explicar y entender estas corrientes que no cesan.

Los elementos químicos más abundantes en el universo son el hidrógeno y el helio. Representan respectivamente en torno al 74% y el 24% de toda la materia observada, con lo que apenas queda un 2% para los demás elementos. Estas proporciones se remontan a la nucleosíntesis primordial, y son un argumento adicional a favor de la teoría del Big Bang, que predice dichas proporciones de hidrógeno y helio, junto con unas trazas de deuterio y litio. Sin embargo, el helio es un elemento escaso en la Tierra: su abundancia en la atmósfera se mide en partes por millón. El helio fue descubierto en 1868 durante un eclipse total de Sol, al analizar la luz de la estrecha capa de su atmósfera, denominada *cromosfera*. Las rayas espectrales de los elementos constituyen un código de barras que les es propio y sirve para identificarlos de manera inequívoca. En 1868 el francés Pierre Janssen y el inglés Norman Lockyer observaron, de manera independiente, una raya amarilla brillante de 587,49 nm. Fue atribuida a un nuevo elemento, desconocido en la Tierra, que recibió el nombre de helio (el nombre griego del Sol es *Helios*), con símbolo químico He.

Años después, en 1895, el inglés William Ramsay se interesó por el gas contenido en un mineral de uranio. Después de separar sustancias conocidas, como nitrógeno y oxígeno, analizó el espectro del gas restante. Encontró una raya amarilla con la misma longitud de onda que la observada en el espectro solar. Otros científicos

confirmaron esta observación e incluso pudieron aislar una cantidad suficiente de helio para determinar su peso atómico. No es casual la presencia de helio en minerales de uranio, dado que estos son radiactivos y emiten partículas alfa, que son los núcleos del átomo de helio. Todas las rocas radiactivas emiten partículas alfa, y por eso el helio natural se encuentra en grandes cantidades en los yacimientos subterráneos de gas natural, en donde permanece atrapado.

Después de licuar el helio, Kamerlingh Onnes intentó solidificarlo, pero sin éxito, como ya explicamos, pese a alcanzar una temperatura de 1 K. Su colaborador, Keesom, lo consiguió en 1926, pero tuvo que aplicar una presión de 150 atm a una temperatura de 4,22 K. A muy bajas temperaturas todas las demás sustancias están en fase sólida, pero el helio permanece en estado líquido aunque se siga enfriando hasta las más bajas temperaturas, muy próximas al cero absoluto. Son necesarias presiones superiores a 25 atm para solidificarlo.

Esta propiedad sorprendente es exclusiva del helio. En el capítulo anterior hemos explicado la solidificación de la materia como resultado de un balance entre la energía potencial, que tiende a mantener sus componentes en posiciones fijas, y la energía térmica, que tiende a separarlos. Al bajar la temperatura, se ralentiza el movimiento de los átomos y domina el efecto de la interacción: el resultado es la solidificación. Pero la física cuántica ha mostrado los límites de la física clásica: sabemos que incluso en el cero absoluto un objeto puede estar en movimiento. Este hecho se puede entender a partir del principio de indeterminación de Heisenberg, que podemos leer así: un átomo confinado en un volumen de dimensiones lineales Δx adquiere un momento lineal mínimo aproximadamente igual a $\hbar/\Delta x$, siendo $\hbar$ la constante reducida de Planck. Esto significa que toda partícula confinada tiene siempre una energía cinética mínima, llamada *energía de punto cero*, que es aproximadamente igual a $\hbar^2/(2m \cdot \Delta x^2)$. En el caso del helio, para temperaturas inferiores a unos 10 K, la energía de punto cero es mayor que la energía cinética debida al movimiento térmico, y es, además, comparable con la energía potencial debida a la débil atracción entre los átomos de helio. Esto explica que permanezca en estado líquido incluso en el cero absoluto, y

DIAGRAMA DE LAS FASES DEL HELIO

El diagrama de las fases del helio se caracteriza por la ausencia de punto triple: las tres fases no coexisten y el helio permanece líquido incluso en el cero absoluto de temperatura. Hay que aplicar grandes valores de presión para conseguir solidificar el helio líquido. Hay una temperatura especial, que se manifiesta al hacer medidas del calor específico del helio en función de la temperatura. Este calor disminuye regularmente al disminuir la temperatura, hasta llegar al valor de 2,17 K, en donde aumenta bruscamente (figura 1). Para temperaturas aún menores, el calor específico disminuye muy rápidamente, haciendo del helio un conductor casi perfecto del calor. Debido a la forma de esta curva, muy parecida a la letra lambda (λ), Ehrenfest propuso llamar *punto lambda* a esta temperatura. Al variar la presión, esta temperatura se hace ligeramente menor, y es la línea λ del diagrama de fases (figura 2). Esta línea separa las fases de líquido normal (He-I) y de líquido superfluido (He-II).

FIG. 1

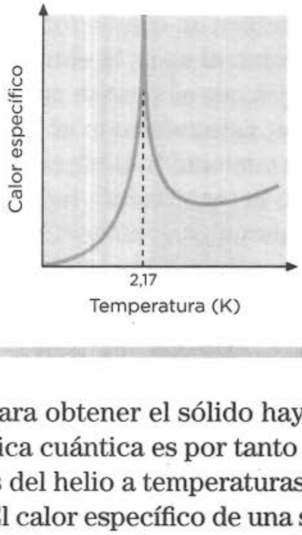
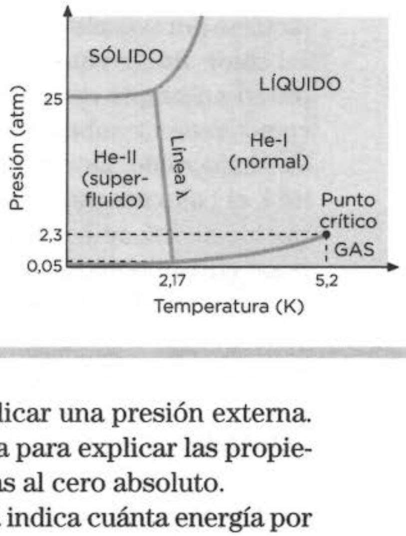


FIG. 2



que para obtener el sólido haya que aplicar una presión externa. La física cuántica es por tanto necesaria para explicar las propiedades del helio a temperaturas próximas al cero absoluto.

El calor específico de una sustancia indica cuánta energía por unidad de masa hay que suministrarle para que su temperatura aumente en un grado. La experiencia muestra que cuanto más frío está un cuerpo, más fácil es calentarlo, lo que significa que el calor específico disminuye al bajar la temperatura. En 1932, Keesom y Clusius, en Leiden, observaron que el calor específico del helio se reduce, efectivamente, al disminuir la temperatura. Pero al llegar a 2,17 K detectaron un brusco aumento de varios órdenes de mag-

nitud, seguido de una disminución a temperaturas inferiores. Como la curva que representa la variación del calor específico en función de la temperatura tiene la forma de la letra griega lambda (λ), se habla del «punto lambda» para referirse a esta temperatura, indicada como T_λ. Esta temperatura separa dos comportamientos muy diferentes del líquido. Por encima del punto lambda, el helio se comporta como un líquido normal, pero en cuanto la temperatura está por debajo de T_λ, presenta propiedades muy sorprendentes. Por eso se distingue entre He-I y He-II, según estemos a uno u otro lado de la temperatura lambda.

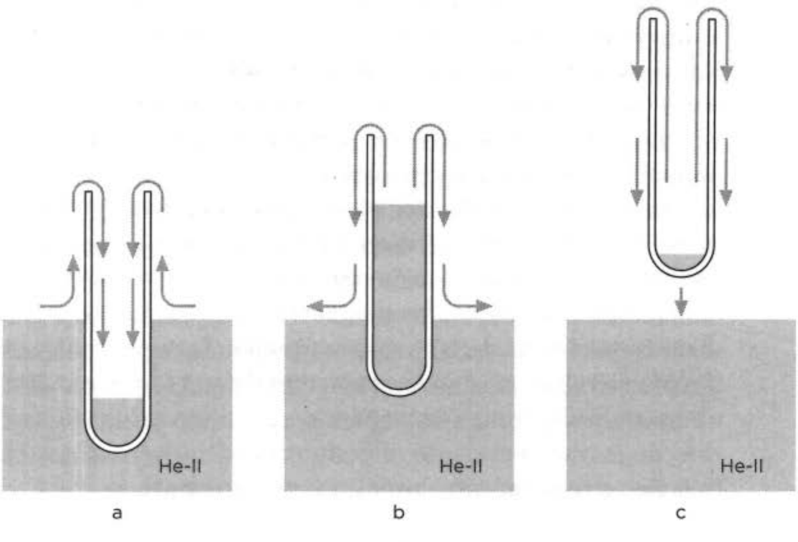
Algunas propiedades del He-II resultan bastante molestas en un laboratorio. Por ejemplo, es capaz de escaparse por el más mínimo poro que encuentre en el recinto que lo contiene. Si se toma He-II de un recipiente mediante un tubo de ensayo, se puede ver cómo el líquido se sube literalmente por sus paredes hasta vaciarse por completo. El He-II es también un conductor perfecto del calor. En un líquido ordinario, como el agua, la ebullición se observa a simple vista por las burbujas que se forman en su volumen. Crecen y suben a la superficie, agitando todo el líquido y haciendo ruido. Este mismo comportamiento lo tiene también el He-I, el helio normal. Pero en cuanto la temperatura baja por debajo de 2,17 K, se dejan de ver burbujas. Sigue habiendo evaporación, pero solo tiene lugar en la superficie y el líquido hierve con toda tranquilidad, por así decirlo.

BOSONES Y FERMIONES

El helio tiene dos únicos isótopos estables, He-4 y He-3. Cuando no se especifica, hay que pensar que se trata del primer isótopo, pues constituye el 99,99986% del helio natural. Los átomos de helio tienen dos electrones, pero el núcleo atómico del He-4 contiene dos protones y dos neutrones, mientras que el del segundo tiene un neutrón menos. Esto hace que las propiedades cuánticas de un isótopo no sean siempre válidas para el otro, pues el He-4 es un bosón y el He-3 un fermión. Las partículas cuánticas tienen

EL HELIO SE ESCAPA

En Oxford, J.G. Daunt y K. Mendelssohn observaron un extraño fenómeno con el He-II. (a) Si introducían un tubo de ensayo vacío en un baño de helio superfluido, el tubo empezaba a llenarse justo hasta el nivel del helio en el exterior. (b) Si extraían un poco el tubo, veían cómo este se vaciaba hasta llegar a la igualdad de niveles de nuevo. (c) Por último, si lo extraían completamente, el tubo se vaciaba, y se observaban gotitas en la parte inferior que caían poco a poco en el baño de helio. Tal como escribió Mendelssohn: «Este es el tipo de cosas que te hacen mirarlas dos veces, frotarte los ojos y preguntarte si es algo real». El He-II forma una fina película en la superficie del recipiente, y todo el líquido se comporta de manera coherente.



una propiedad, llamada *espín*, que no tiene análogo en la física clásica. Su valor se suele indicar por un número s en unidades de la constante reducida de Planck $\hbar$. Los valores del espín s solo pueden ser números enteros o semienteros (es decir, números impares divididos por dos). Las partículas se clasifican así en bosones o fermiones, según que su espín sea entero o semientero. Los electrones, los protones o los quarks son fermiones de espín 1/2 y los fotones son bosones de espín 1.

Un sistema formado por varias partículas también posee espín, cuyos posibles valores se obtienen sumando los espines de los constituyentes según unas reglas dadas por la mecánica cuántica, que no especificaremos aquí. Basta señalar que la suma de números enteros es siempre un entero, por lo que un sistema formado por bosones también es un bosón. En cambio, la suma de números semienteros puede dar un número entero o uno semientero: un sistema formado por un número par de fermiones será un bosón, mientras que un número impar será un fermión. Así, el protón es un fermión de espín 1/2, formado por tres quarks de espín 1/2. El átomo de He-3 es también un fermión, pues está formado por cinco fermiones: dos electrones, dos protones y un neutrón. En cambio, el átomo de He-4 es un bosón, formado por seis fermiones: dos electrones, dos protones y dos neutrones. Los valores medidos de los espines totales son 1/2 para el He-3 y 0 para el He-4.

Para los fermiones rige el principio de exclusión de Pauli, que enunciado de forma simple afirma que no más de dos fermiones idénticos (por ejemplo, dos electrones en un átomo) pueden ocupar el mismo estado cuántico. Esta restricción no existe para los bosones, para los que sucede más bien lo contrario: a temperaturas suficientemente bajas, los bosones tienen tendencia a ocupar el mismo estado cuántico de menor energía. La superfluidez del He-4 líquido se relaciona con la propiedad de que todos sus átomos se comportan coherentemente cuando se eliminan los efectos térmicos, de forma semejante al comportamiento de un gas ideal de bosones a temperaturas próximas al cero absoluto.

EL CONDENSADO DE BOSE-EINSTEIN

Los niveles de energía de un sistema cuántico dependen de las interacciones que entren en juego, pero en un gas ideal solo interviene la energía cinética de sus componentes. En este caso, el nivel de menor energía corresponde a la energía de punto cero. La temperatura hace que los distintos estados de energía sean ocupados con cierta probabilidad, según sean los valores de la energía y de la

temperatura. En física clásica, esta probabilidad viene dada por la función de distribución de Boltzmann, que es básicamente una función exponencial del cociente entre energía y temperatura. En física cuántica hay que considerar funciones de distribución distintas para bosones y para fermiones.

A principios de la década de 1920, el físico indio Satyendra Bose, de la Universidad de Daca (la capital actual de Bangladés), se interesó por la fórmula de Planck que inició la física cuántica. Recordemos que Planck había deducido la distribución de las frecuencias de la radiación electromagnética contenida en una cavidad. Para ello había tenido que formular una hipótesis muy especial: los intercambios de energía se producen en múltiplos enteros de una cantidad mínima. Einstein sugirió que esto indica que la propia radiación está cuantificada, es decir, formada por partículas que llamamos *fotones*. La idea de Bose fue considerar que la radiación dentro de la cavidad está formada por un gas de partículas idénticas. Calculó sus propiedades en el equilibrio térmico y encontró precisamente la fórmula empírica de Planck. Bose escribió sus deducciones y resultados, y se los mandó a Einstein. En su carta le pedía su opinión y, en caso de ser positiva, le rogaba que enviara el manuscrito a una revista científica para su publicación. Einstein quedó impresionado por el resultado, y él mismo tradujo el artículo del inglés al alemán y lo envió a la revista *Zeitschrift für Physik*, con el comentario de que se trataba de un avance realmente importante.

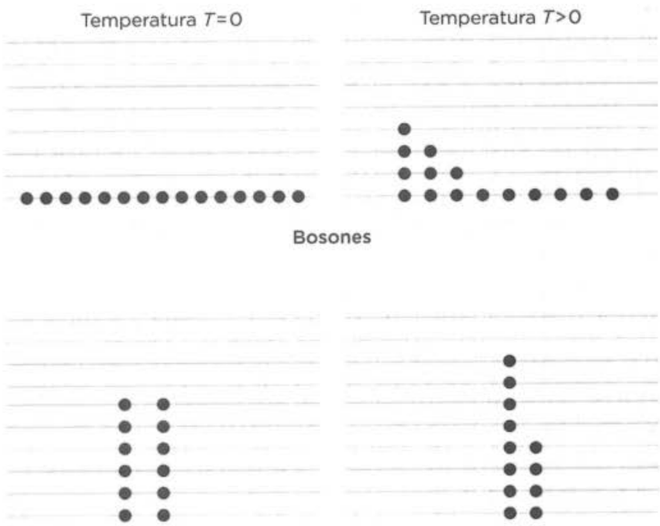
Los fotones son partículas sin masa, y Einstein generalizó el cálculo de Bose al caso de un gas de átomos con masa. Un aspecto crucial de la deducción es que debía suponer que las partículas de este gas eran estadísticamente independientes. Einstein no sabía explicarlo, y se refería a una misteriosa «hipótesis de influencia mutua». Más tarde se demostró que se trata de un efecto cuántico: las partículas son idénticas e indistinguibles, lo que tiene ciertas consecuencias matemáticas, según se trate de bosones o de fermiones. En el primer caso, la función de ondas no varía al intercambiar dos bosones cualesquiera, y se dice que es completamente simétrica respecto al intercambio. Por el contrario, en el caso de fermiones, cambia de signo, y se dice que es antisimétrica. Las

BOSONES Y FERMIONES

Los valores de las posibles energías de un sistema cuántico se han representado mediante líneas en la figura. Supongamos que las partículas (representadas por las bolitas) están confinadas en cierto volumen y no interaccionan entre sí. Según el principio de Pauli, los fermiones no pueden ocupar el mismo estado cuántico, restricción que no se aplica a los bosones. A la temperatura cero, los bosones ocupan el mismo estado cuántico de menor energía, mientras que en el caso de los fermiones (de espín 1/2 en la figura) solo puede haber dos en un mismo estado de energía, ocupados sucesivamente para que la energía total sea mínima. El efecto de la temperatura es que los estados de más alta energía se ocupan con cierta probabilidad, que es distinta para bosones y fermiones. La probabilidad de ocupación de un nivel de energía ε a la temperatura T se escribe como:

$$f(\varepsilon)=\frac{1}{Ce^{\varepsilon/k_B}\pm 1},$$

en donde el signo + se aplica a los fermiones, y el signo -, a los bosones. El símbolo C es una constante de normalización, y k_B es la constante de Boltzmann. Toda la diferencia con las partículas clásicas está en la presencia de ese ±1 en el denominador. Si se suprime, estas distribuciones coinciden con la distribución clásica de Boltzmann.



Fermiones de espín 1/2

propiedades estadísticas de un conjunto de partículas clásicas se describen mediante la distribución de Boltzmann, que indica la probabilidad de que una partícula tenga una energía dada, y a partir de la cual se calculan las propiedades medias del gas. En el caso de partículas cuánticas, hay que utilizar las distribuciones de Bose-Einstein (para bosones) o de Fermi-Dirac (para fermiones).

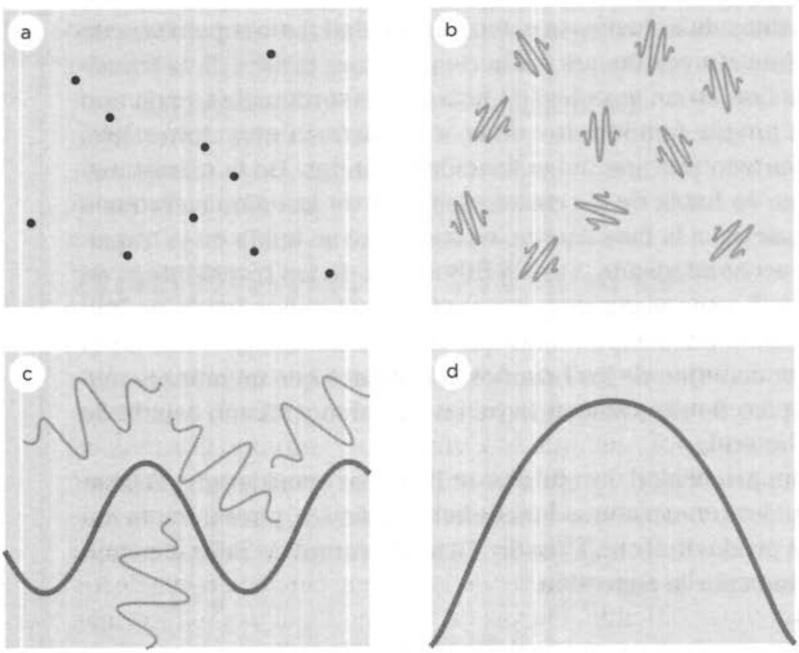
Einstein continuó el estudio de las propiedades generales de un gas de bosones, y observó la existencia de una temperatura crítica, que hoy se llama *temperatura de Bose-Einstein* (T_{BE}), por debajo de la cual el estado de mínima energía cinética está ocupado por un número macroscópico de componentes. De manera precisa, si indicamos por N el número total de componentes del sistema y por N_0 aquellos que ocupan el estado de mínima energía, su cociente depende de la temperatura como $N_0/N = 1 - (T/T_{BE})^{3/2}$. Según esta expresión, si el valor de la temperatura es la mitad del valor crítico ($T = T_{BE}/2$), el 65% de los bosones ocupan el estado de menor energía. Esta fracción macroscópica posee propiedades destacables de coherencia y de colectividad. La temperatura de Bose-Einstein resulta ser así la temperatura crítica de la transición de fase de un gas ideal de bosones desordenados, cada uno con su propia función de ondas, a un sistema muy coherente, representado por una única función de ondas. De la misma manera que se habla de la condensación de un gas para referirse a su transición a la fase líquida, en este caso se habla de la transición a un condensado. Pero a diferencia de las transiciones de fase que hemos visto anteriormente, en el condensado no hay interacción, pues suponemos que se trata de un gas ideal. Es el carácter cuántico de los bosones el que hace que un número macroscópico de ellos se condense en un único y mismo estado de menor energía.

Esta predicción, formulada en 1924, fue considerada durante mucho tiempo como una curiosidad académica, pues parecía imposible producir el condensado. La temperatura de Bose-Einstein viene dada por la expresión:

$$T_{BE} = \frac{3{,}31\,\hbar^2}{k_B}\,\frac{n^{2/3}}{m}.$$

FORMACIÓN DEL CONDENSADO DE BOSONES

En esta serie de figuras se muestra de manera esquemática la formación de un condensado de bosones al bajar la temperatura. En todas ellas suponemos la misma densidad, o lo que es lo mismo, la misma distancia media entre partículas, que designaremos por la letra *L*. A altas temperaturas (a), se tiene un sistema clásico de partículas, con velocidad media proporcional a la temperatura. Cuando baja la temperatura, llega un momento en que aparecen los efectos cuánticos, y las partículas manifiestan un comportamiento ondulatorio caracterizado por una longitud de onda λ. El recuadro (b) ilustra un caso en el que esta longitud de onda es pequeña en comparación con *L*. Al seguir bajando la temperatura, aumenta la longitud de onda cuántica, y por debajo de la temperatura de Bose-Einstein, es comparable a *L*. Las ondas asociadas a las partículas empiezan a superponerse, y algunas forman una única onda, reflejada con el trazo grueso en el recuadro (c). Finalmente, en el cero absoluto (recuadro d), la superposición es completa y hay una única función de ondas que describe el comportamiento global de todos los bosones. Todos ellos ocupan el estado de menor energía, y se ha alcanzado el condensado puro de Bose-Einstein.



En el primer factor aparecen la constante reducida de Planck $\hbar$, que indica, por si hubiera alguna duda, el carácter cuántico del fenómeno, así como la constante de Boltzmann k_B, que aparece siempre que se relacionan temperatura y energía. Las características del sistema de bosones que intervienen son su densidad número, o número n de bosones por unidad de volumen, y la masa m de cada bosón idéntico. La fórmula anterior muestra qué tipo de dificultades prácticas existen para poder observar este condensado. La densidad ha de ser grande, para poder alcanzar temperaturas distintas del cero absoluto, pero a la vez muy pequeña para que el sistema pueda considerarse un gas ideal, lo que es un difícil equilibrio. Dado que la masa aparece en el denominador, se pensó que sería mucho más fácil observar el fenómeno con un gas de hidrógeno, que constituye el elemento más ligero, y cuyos átomos son bosones. Pero todavía había una dificultad más: en condiciones normales, el hidrógeno se presenta en estado molecular, debido a la fuerte interacción entre sus átomos. Resulta necesario aplicar un fuerte campo magnético para llegar a obtener un gas de átomos de hidrógeno.

Sin embargo, a pesar de todos los esfuerzos, no se pudo observar ningún condensado de átomos de hidrógeno hasta 1995, después de que se lograra formar el primer condensado utilizando átomos alcalinos. Desde entonces se sigue utilizando básicamente la misma técnica para producir condensados de átomos. Primero hay que lograr un gas muy diluido de átomos, típicamente entre 10^{11} y 10^{15} átomos por cm^3, en una pequeña región espacial, utilizando un sistema de campos magnéticos que de manera expresiva se llama *trampa magnética*. Estos valores de la densidad de átomos parecen muy grandes, pero hay que tener en cuenta que en el helio líquido, por ejemplo, hay unos $2 \cdot 10^{22}$ átomos por cm^3, es decir, una densidad más de diez millones de veces mayor. A pesar de ello, las temperaturas han de ser mucho menores que una milésima de kelvin (mK). Para alcanzarlas, se enfría el gas mediante un sistema de láseres, reduciendo la energía cinética media de los átomos, y permitiendo a la vez que salgan de la trampa los más energéticos. El procedimiento no es sencillo pero, como suele suceder, lo más difícil fue lograrlo la primera vez.

De manera independiente, dos grupos estadounidenses consiguieron mostrar en 1995 la existencia del condensado de Bose-Einstein. En la Universidad de Colorado, el grupo de Eric A. Cornell y Carl E. Wieman observó el condensado de unos 2 000 átomos de rubidio, con una energía cinética media correspondiente a la temperatura de 170 nK. Unos meses después, en el MIT, el grupo de Wolfgang Keterlee lo hizo con unos cien mil átomos de sodio. Estos tres científicos recibieron el premio Nobel de Física de 2001 por sus logros, que iniciaron la investigación en la física de los átomos ultrafríos. En realidad, los gases producidos no son exactamente gases ideales, sino que entre sus átomos existe una interacción muy pequeña. Todo ello ha abierto un gran número de vías muy interesantes, como por ejemplo la posibilidad de fabricar láseres de átomos, análogos a los láseres de fotones, pero que tendrían la ventaja de una menor dispersión.

PIOTR KAPITSA

Por su importancia en esta historia, hay que hablar del físico ruso Piotr Leonídovich Kapitsa (1894-1984). Estudió en el Instituto Politécnico de San Petersburgo, con la idea de hacerse ingeniero. La Primera Guerra Mundial interrumpió sus estudios, pero en 1916 tuvo la oportunidad de asistir a una sesión del seminario de Ioffe, y decidió entonces que se dedicaría a la física. Al acabar la guerra, perdió en un corto espacio de tiempo a su mujer, a sus hijos y a su padre, víctimas de la epidemia de «gripe española» que asoló muchos países europeos. Para ayudarle a superar este trance, Ioffe consiguió la financiación y los permisos necesarios para que Kapitsa pudiera salir de la URSS y completara su formación en centros de investigación europeos.

A mediados de 1921, Kapitsa llegó a Cambridge y le pidió a Rutherford que le acogiera en su laboratorio durante unos meses. Rutherford aceptó, pero la estancia se alargó hasta convertirse en trece años. Rutherford le propuso estudiar el paso de partículas alfa a través de la materia, y quedó muy satisfecho al descubrir que

Kapitsa tenía especiales habilidades como físico experimental. Diseñó y construyó un generador especial de pulsos magnéticos muy cortos, de unos milisegundos, pero muy intensos, con el que pudo hacer medidas precisas. Rutherford decía que Kapitsa tenía la mentalidad de un físico y la habilidad de un mecánico, una combinación tan rara «que hace de él un fenómeno». En 1923 Kapitsa obtuvo el grado de doctor en Cambridge, y a partir de 1925 se hizo cargo del laboratorio dedicado al magnetismo. Como muchas propiedades de las sustancias aparecen más claramente al reducir los efectos térmicos, Kapitsa empezó a interesarse en las bajas temperaturas y a experimentar con hidrógeno y helio líquidos. En aquellos años, solo existían laboratorios criogénicos en Leiden, Berlín y Ottawa, pero se estaban preparando algunos más. En 1933, la Universidad de Cambridge inauguró el laboratorio Mond (nombre del industrial que lo financió), dedicado al estudio del magnetismo y las bajas temperaturas bajo la dirección de Kapitsa.

A partir de 1926 empezó a visitar regularmente la URSS, pero se resistía a aceptar las ofertas que se le hacían en Moscú para que regresara definitivamente. En 1929 fue nombrado miembro correspondiente de la Academia de Ciencias, y aceptó actuar como consultor oficial del recién creado Instituto Físico-Técnico de Ucrania (UFTI), en el que Shubnikov había instalado el primer laboratorio soviético de bajas temperaturas. A finales del verano de 1934, cuando acabó su estancia anual en la URSS, se encontró con la sorpresa de que las autoridades soviéticas le prohibieron la salida por orden expresa de Stalin. El motivo oficial era la importancia que su investigación y asistencia tenían para la industria soviética. Con este fin, en diciembre de 1934 el Politburó (el máximo órgano ejecutivo del Partido Comunista) aprobó la creación de un nuevo instituto científico en Moscú, integrado en la Academia de Ciencias. Kapitsa pasó a ser director del Instituto de Problemas Físicos (IFP; Institut Fisicheski Problem). Empezó a funcionar en 1936, después de que el Gobierno soviético aceptara equiparlo con instalaciones semejantes a las que Kapitsa había diseñado e instalado en Cambridge.

La figura de Kapitsa es relevante en esta historia por diversos motivos. Fue una figura importante en la URSS, no solo por sus

logros científicos, sino por su influencia decisiva en asuntos científicos, técnicos e industriales. Por ejemplo, en 1938, después de visitar una planta industrial de aire líquido, diseñó un prototipo para licuar el aire de manera más eficiente, y pudo obtener oxígeno y nitrógeno líquidos, cuya producción tenía cada vez más importancia en la industria. El prototipo dio origen en 1942 a grandes instalaciones de producción industrial, todas ellas supervisadas por Kapitsa, de gran valor estratégico en la guerra contra Alemania.

Cualquier ciudadano soviético podía escribir cartas a periódicos, instituciones, funcionarios, ministros o incluso al mismo Stalin, para expresar críticas sobre cuestiones concretas. No escapa a nadie que este tipo de literatura no era la más practicada por la ciudadanía, pero Kapitsa escribió centenares de cartas a Stalin, a Molotov (primer ministro del Gobierno) y a otros dirigentes políticos. La mayoría de las veces trataba de asuntos relacionados con la ciencia, la industria o la educación, en los que Kapitsa creía poder dar opiniones útiles. También se refería a asuntos de su instituto, e incluso en ocasiones se quejaba del trato que él mismo recibía por parte de las autoridades o del retraso en unas obras. Su actitud era siempre respetuosa y pragmática, dejando claro en todo momento que su objetivo era contribuir a desarrollar la ciencia y la industria en la URSS y a construir el socialismo. Evitaba cuidadosamente tocar cualquier tema político, pero su actitud era firme y no tenía nada de servil. Aunque no todas las cartas recibían contestación (Stalin solo le respondió en dos ocasiones), la mayoría de ellas lograban su objetivo.

En varias ocasiones, Kapitsa defendió en sus cartas a científicos amenazados o detenidos, a riesgo de poner en peligro su propia posición. Solo apoyaba a científicos, porque sabía que en estos temas tenía una autoridad reconocida, pero no podía escribir cada vez que se detenía a alguno de ellos. Para tener ciertas probabilidades de éxito, se limitaba a aquellos que tuvieran un reconocimiento internacional. En 1936, el matemático Nikolai Luzin fue blanco de ataques en artículos sin firma publicados en el periódico *Pravda*. Kapitsa escribió al primer ministro Molotov para criticar que se pudieran publicar calumnias anónimas y sin fundamento contra un reconocido matemático, que debía ser juzgado por la

calidad de su trabajo aunque «difiera ideológicamente de nosotros». Los ataques cesaron inmediatamente. En febrero de 1937, fue detenido Vladimir Fock, de quien ya hemos hablado con anterioridad. En esta ocasión, Kapitsa se dirigió a Stalin, para informarle de que Fock era el físico teórico más destacado de la URSS. Se atrevió incluso a decir que se podía llegar con Fock a una situación tan vergonzosa como la de Einstein con los nazis. Fock fue liberado a los pocos días. Kapitsa no siempre tuvo el mismo éxito con sus cartas, pero nunca dejó de intentarlo. Más adelante veremos lo que hizo para salvar a Landau, pero ahora vamos a hablar del logro más importante de Kapitsa en el terreno de la física.

LA SUPERFLUIDEZ DEL HELIO

La propiedad más característica del He-II es la superfluidez: por debajo de 2,17 K el helio es capaz de fluir sin viscosidad aparente a través de un capilar. Esta es también una manifestación macroscópica de un efecto genuinamente cuántico, como el que permanezca líquido incluso en el cero absoluto de temperatura. El helio líquido es el líquido cuántico por excelencia, aunque no es el único.

La ciencia es una actividad colectiva, que requiere intercambios entre científicos. Por eso sucede a menudo que un mismo descubrimiento sea realizado de manera independiente, e incluso al mismo tiempo, por varios investigadores o grupos. En enero de 1938, la revista *Nature* publicó dos artículos, uno a continuación del otro, sobre la viscosidad del helio. El primero llegó a la revista el 2 de diciembre de 1937, enviado desde Moscú por Kapitsa. El segundo fue recibido el día 27 del mismo mes, remitido por los canadienses John F. Allen y Austin D. Missener desde el laboratorio Mond de Cambridge. En 1934, Allen había ido a Cambridge para trabajar con Kapitsa, pero muy a su pesar tuvo que arreglárselas sin él, aunque pudo usar las instalaciones que había dejado el científico ruso. Algunos físicos han debatido sobre la prioridad del descubrimiento de la superfluidez, sobre lo que Kapitsa sabía o no de los progresos de los «herederos» de su laboratorio, etcétera.

Son cuestiones en las que no entraremos, que a menudo se basan en interpretaciones más o menos sutiles de los hechos.

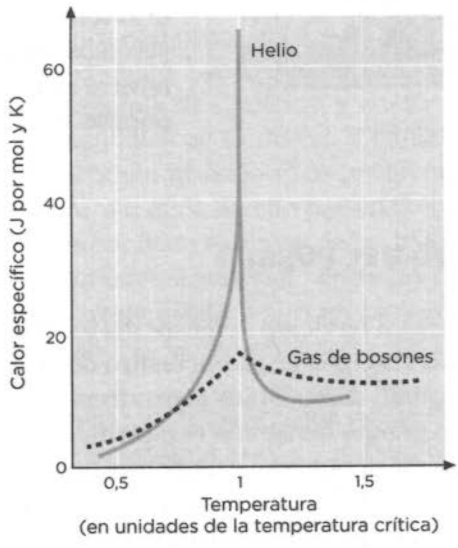
La viscosidad de un líquido es una medida de su resistencia para moverse por una tubería o conducción. La miel es un buen ejemplo de líquido viscoso, y no hace falta intentar sorberla con una pajita para convencerse de que opone una gran resistencia a este tipo de movimiento. En un laboratorio, se puede medir la viscosidad de un líquido a través de las pérdidas de presión que sufre cuando fluye por un tubo, o a través del amortiguamiento de la rotación de un objeto introducido en el líquido. Antes de 1938, diversos experimentos indicaban que la viscosidad del He-II podía ser menor que la del He-I. La novedad aportada por los científicos citados fue medir la velocidad del líquido cuando fluye a través de un fino capilar (Kapitsa) o de finas rendijas (Allen y Missener). En ambos casos, el resultado es que por debajo del punto lambda (la transición de He-I a He-II), la velocidad del flujo de helio aumenta bruscamente y su viscosidad disminuye en muchos órdenes de magnitud. Kapitsa asoció esta propiedad a la ausencia de resistencia eléctrica en los superconductores, que veremos en el próximo capítulo, y por analogía le dio el nombre de *superfluidez*.

En ese mismo año surgieron los primeros intentos de explicación. En París, el alemán Fritz London (1900-1954) sugirió que esta propiedad debe relacionarse con el carácter bosónico de los átomos de He-4. La curva que da el calor específico de un gas de bosones con la temperatura tiene la forma de una V invertida, lo que recuerda a la lambda (λ) del helio. London calculó la temperatura crítica de un gas de bosones con la misma masa que un átomo de helio y a la misma densidad que el helio líquido. Obtuvo 3,2 K, un valor tan próximo a la temperatura del punto lambda, de 2,17 K, que le era «difícil no imaginar una relación con la condensación de Bose-Einstein». London era consciente de las limitaciones de su propuesta, al asimilar el helio líquido con un gas ideal.

Poco después intervino el húngaro Laszlo Tisza (1907-2009), que había superado el mínimo teórico de Landau en Járkov. En 1937 obtuvo un contrato en París, y pudo discutir con London sobre su propuesta de asociación entre la superfluidez y el condensado de Bose-Einstein. Tisza desarrolló lo que se conoce como *modelo de*

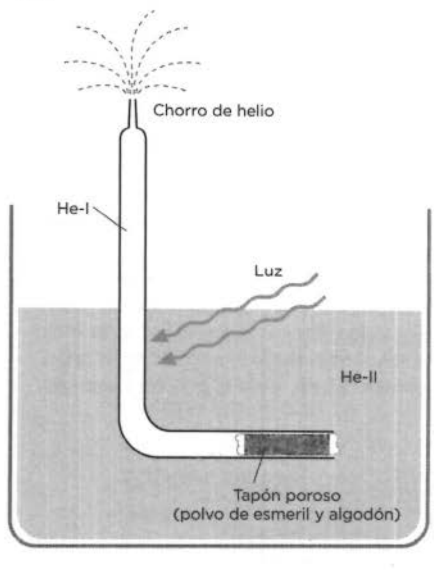
CALOR ESPECÍFICO DEL HELIO LÍQUIDO Y DE UN GAS IDEAL DE BOSONES

En la figura se comparan los calores específicos (en unidades de julio por mol y kelvin) en función de la temperatura (en unidades de la temperatura crítica) en dos casos. La línea continua corresponde a los valores medidos para el helio líquido, y la temperatura crítica es la del punto lambda. La línea discontinua corresponde al cálculo para un gas ideal de bosones, cuya masa es igual a la de un átomo de Helio-4, y la temperatura crítica es la de la transición de Bose-Einstein. Hay que destacar dos diferencias entre estas curvas. La primera se refiere al comportamiento cerca de la temperatura crítica: en el helio hay un pico muy pronunciado, mientras que en el gas ideal de bosones hay simplemente un cambio de pendiente. La segunda diferencia se refiere a la manera en que los calores específicos se anulan al acercarse al cero absoluto. En el helio se anula como T^3, el cubo de la temperatura, y en el gas de bosones lo hace de manera más suave, como $T^{3/2}$.



los dos fluidos. Suponía que el helio líquido es una mezcla de dos componentes, uno superfluido y otro normal. Sus densidades respectivas dependen de la temperatura, de manera que en el cero absoluto todo el líquido es superfluido, mientras que por encima de la temperatura crítica todo el líquido es normal. Haciendo algunas

FIG. 1



El recipiente contiene He-II y el tubo consta de un tapón poroso con polvo de esmeril y algodón, que permite el paso de He-II pero no de He-I. Si exponemos el conjunto a la luz, el He-II cambiará de fase a He-I al aumentar la temperatura. El He-I en el interior del tubo no tendrá más remedio que escapar por la boquilla superior del tubo porque el tapón le impide el paso al recipiente, produciendo una fuente que se va alimentando por el He-II que penetra en el tubo y luego se convierte en He-I.

hipótesis suplementarias, este modelo ayudó a entender algunas de las propiedades observadas. Por ejemplo, el llamado efecto fuente (figura 1). Cuando en un baño de He-II se aumenta localmente la temperatura, se observa al mismo tiempo un aumento de la presión. Con un dispositivo adecuado, se puede conseguir un espectacular surtidor de helio, con solo iluminar una pequeña zona. Esto se explica como un movimiento del componente superfluido para mantener el equilibrio térmico. Sin embargo, como veremos más adelante, Landau se mostró muy contrario a estas propuestas de London y de Tisza.

ENEMIGO DEL PUEBLO

Landau era un ferviente defensor del modelo de sociedad soviética. Hemos visto que en su encuentro con estudiantes daneses, en marzo de 1931, defendía sus logros frente a la sociedad capitalista. Al mismo tiempo denigraba el materialismo dialéctico, una pseudociencia en su opinión, y no perdía oportunidad de ridiculizar a sus partidarios. Landau no era muy consciente de cómo había evolucionado la sociedad soviética durante su ausencia. Pero la cadena de acontecimientos que le hicieron abandonar Járkov le hizo darse cuenta de lo que estaba pasando. En el verano de 1937, Peierls asistió a un congreso de física en Moscú, y pudo visitar a su amigo. Landau solo le habló libremente durante un paseo por un parque porque sabía que estaba siendo vigilado. El grupo de los tres mosqueteros ya no existía. Gamow era un «traidor a la patria» por haber abandonado la URSS en 1933. Ivanenko había

sido detenido en 1935 y deportado. Bronstein fue detenido en agosto de 1937 y fusilado secretamente en febrero de 1938. Landau confesó a su amigo sus temores a ser detenido al igual que sus colegas de Járkov.

> «La nueva idea de Landau es muy interesante y prometedora.»
>
> — NIELS BOHR, SOBRE LA HIPÓTESIS DE LANDAU ACERCA DEL ORIGEN DE LA ENERGÍA EN LAS ESTRELLAS.

Landau elaboró una estrategia de protección, buscando con antelación un apoyo internacional. Decidió publicar un trabajo sobre un problema aún no resuelto, el origen de la energía en la estrellas, y darle una gran resonancia. En noviembre de 1937, envió un artículo a Bohr, pidiéndole que si estaba de acuerdo con el contenido físico, lo enviara a la revista inglesa *Nature*. Podía haberlo enviado él mismo, pero este paso intermedio formaba parte de su estrategia. Al mismo tiempo, Landau mandó una versión en ruso a la revista de la Academia de Ciencias, y contactó con el periódico *Izvestia* informándoles de su teoría. A finales de mes, el periódico publicó un artículo titulado «Los problemas de las fuentes de energía estelar», sin duda escrito por un físico que conocía bien el problema. Se hacía un resumen de las ideas de Landau, se mencionaba el gran interés suscitado entre los físicos soviéticos así como su próxima publicación en la revista de la Academia. Además, el periódico había contactado con Bohr y reproducía su opinión.

Pero Landau fue detenido en la madrugada del 28 de abril de 1938, al mismo tiempo que sus amigos Koretz y Rumer. Esa misma mañana, en cuanto se enteró, Kapitsa escribió una carta a Stalin. En ella elogiaba la calidad científica de Landau, reconocida internacionalmente, se refería al reciente y publicitado trabajo sobre las estrellas, así como a la positiva opinión de Bohr.

> No hay duda de que la pérdida de Landau como científico no pasará desapercibida, sino que será profundamente sentida en el Instituto, en la URSS, y en el mundo entero. Por supuesto que el saber y el talento, por extraordinarios que sean, no autorizan a nadie a contravenir las leyes de su país, y si Landau es culpable debe responder

> por ello. Pero le ruego que, en vista de su talento excepcional, reclame que su caso se examine cuidadosamente.

Acababa la carta con este párrafo: «Landau es joven, y aún tiene mucho que hacer en la ciencia. Solo otro científico podía escribir sobre todo esto, y es la razón por la que le escribo».

No recibió respuesta, pero el curso de los acontecimientos hace pensar que esta carta tuvo efectos positivos para Landau. Normalmente, la detención de un «enemigo del pueblo» venía acompañada de medidas contra sus familiares y amigos próximos, y de una asamblea general en su centro de trabajo para que sus colegas le condenaran. Nada de esto sucedió en el caso de Landau. Nadie sabía dónde se encontraba detenido. Su madre, que residía en Leningrado, intentó averiguarlo con el envío de paquetes a su nombre a todas las cárceles de Moscú, pero todos le fueron devueltos. Su hermana se entrevistó con un alto cargo de la policía, pero solo se encontró con la amenaza de ser ella misma detenida por defender a un enemigo del pueblo. Bohr escribió directamente a Stalin a través de la embajada soviética en Dinamarca sin recibir respuesta alguna.

Afortunadamente para Landau, el final de las grandes purgas había llegado. A finales de 1938, la mayoría de dirigentes del NKVD fueron depuestos y muchos de ellos detenidos y fusilados más tarde. Como la situación política parecía estar cambiando, Kapitsa escribió a principios de abril de 1939 al jefe del Gobierno, lo que a la postre resultó determinante para liberar a Landau. La carta empezaba con una mención a sus propios y recientes trabajos sobre la superfluidez, a la importancia de entender este fenómeno y a la necesidad de contar con la ayuda de un físico teórico. «En la URSS tenemos uno que domina por completo la teoría necesaria: se trata de Landau, pero está detenido desde hace un año». Kapitsa elogiaba la calidad científica de Landau («a pesar de tener solo treinta años es muy famoso en Europa»), pero también reconocía sus defectos:

> Es cierto que tiene una lengua muy afilada, y que al abusar de ello, con su agudo ingenio, se ha hecho muchos enemigos que se alegran siempre causándole problemas.



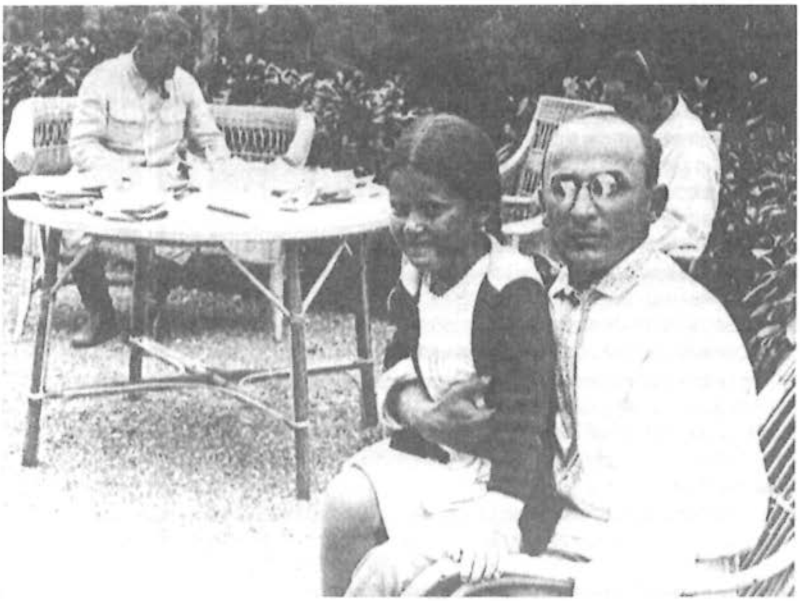


FOTO SUPERIOR:
Fotografía tomada durante la visita de Kapitsa (en primera fila, a la derecha) al UFTI en 1934. Junto a Kapitsa se encuentra Landau, y en el extremo izquierdo, su amigo y colega Shubnikov. Este y Landau eran conocidos por el resto de colegas como «Lev el gordo» y «Lev el flaco».

FOTO INFERIOR:
Fotografía de dos de los artífices de la Gran Purga stalinista, Stalin y Beria: en primer plano, Beria, jefe del NKVD, la policía secreta rusa, con la hija de Stalin (al fondo, fumando en pipa), Svetlana, en su regazo. Detrás de ellos se encuentra Lakoba, jefe del Partido Comunista en Abjasia.

Kapitsa reconocía su intromisión en asuntos del Ministerio del Interior, pero a pesar de ello indicaba algunas anomalías en este asunto:

> 1) Landau lleva en prisión un año, y no se ha llegado a ningún resultado, lo que es un tiempo anormalmente largo para que continúe la investigación.
> 2) Soy director del instituto en el que trabaja, pero no sé en absoluto de qué se le acusa.

LANDAU EN LOS ARCHIVOS DEL KGB



Foto de Landau procedente de los archivos del KGB en la prisión de Lubianka (1938).

En 1990, el fiscal general del Estado revocó la resolución del NKVD de 1939 sobre Landau y ordenó cerrar las actuaciones contra él, pasadas y futuras, por no haber crimen alguno. En 1991, el KGB (creado en 1954 para asumir las competencias del NKVD en asuntos de policía política y de espionaje), publicó en el diario *Izvestia* un artículo sobre la detención de Landau y parte de su expediente policial. En una confesión de seis páginas (sin duda el mayor número escrito en su vida de su puño y letra), Landau había reconocido todas las acusaciones de la policía: su oposición al materialismo dialéctico, que siempre consideró perjudicial para la ciencia; su aceptación de las teorías idealistas burguesas; la complicidad de Gamow, Bronstein e Ivanenko para propagar ideas antisoviéticas entre los estudiantes; sus actividades de sabotaje a la línea del Partido Comunista sobre la organización de la ciencia; su campaña para que en el UFTI se separaran la física aplicada y la investigación básica, etc. Este tipo de acusaciones eran las habituales contra los científicos detenidos. En ocasiones se añadía la de espionaje, sobre todo a favor de la Alemania nazi.

La octavilla de Koretz

Lo que resulta sorprendente de esta confesión es que Landau reconoció haber ayudado a Koretz en la redacción de una octavilla, firmada por el

Kapitsa sabía muy bien que ni las detenciones tenían plazo máximo, ni el ministerio tenía que dar información, pero con estos argumentos tomaba la actitud del ingenuo que indica algún funcionamiento anormal de la justicia soviética. Los dos siguientes argumentos iban más dirigidos. La ciencia soviética y la ciencia mundial han estado privados durante un año de un científico importante, «y si muriera en vano, sería algo muy vergonzoso para nosotros, la nación soviética». Pidió la intervención de Molotov para hacer avanzar el caso y, si ello no fuera posible, que se per-

inexistente Partido Obrero Antifascista, que debía ser copiada y difundida durante la celebración de la manifestación del 1 de mayo. En la octavilla se hacía una encendida defensa de la Revolución de octubre, un virulento ataque al Gobierno de Stalin y se pedía a los obreros del país que derrocaran al dictador fascista y a su banda. El historiador S. Gorelik fue el primero que pudo acceder al expediente de Landau. Sin embargo, no pudo ver la octavilla manuscrita, atribuida a Koretz, sino solo una copia mecanografiada por la policía. No obstante, opina que la octavilla parece auténtica, entre otras razones porque el estilo se corresponde con el de Landau. Pero para la mayoría de físicos próximos al científico ruso, es solo una prueba falsa, como tantas otras que solía fabricar el NKVD.

La vigilancia del KGB

En el expediente de Landau también se guardan diversas notas e informes sobre muchas de sus conversaciones y opiniones. La policía había instalado micrófonos ocultos, o sistemas similares, tanto en el IFP como en el apartamento de Landau, para escuchar y grabar sus conversaciones. También tenía informadores en su entorno próximo, cuyas identidades son aún desconocidas. Landau era consciente de esta vigilancia y, según han referido algunos de sus interlocutores, solía salir al exterior de los edificios cuando hablaba de temas comprometidos. Pero no siempre lo hizo, y en los archivos policiales se conservan opiniones tan peligrosas como: «Nuestro régimen, tal como lo conozco desde 1937, es sin ninguna duda un régimen fascista [...]. Está claro que Lenin fue el primer fascista». La policía no actuaba contra Landau porque, al igual que se escribió en el oficio que lo sacó de prisión, seguía siendo útil para la ciencia soviética. Los archivos muestran que el entusiasmo de Landau por los ideales de la Revolución de octubre dio paso en la década de 1930 a un completo rechazo de la sociedad y el socialismo soviéticos.

mitiera a Landau hacer trabajo científico en una prisión especial, «me han dicho que esto se hace con ingenieros». En efecto, había prisiones o campos especiales, las llamadas *sharashkas*, en las que científicos e ingenieros trabajaban en proyectos para el Estado, pero Kapitsa dijo que solo lo sabía de oídas.

Esta vez, la carta surtió efecto, y Landau fue liberado con el aval personal de Kapitsa. Un aval que estuvo activo durante veintinueve años, hasta la muerte de Landau. Uno de los discípulos de Landau, Lev Pitaevskii, cuenta que siempre que alguien le pregunta para qué sirve la superfluidez, no puede dejar de pensar que su primera aplicación importante fue salvar la vida de Landau. Este estaba convencido que su extrema fragilidad física no le habría permitido resistir más de unos pocos meses en las condiciones de detención e interrogatorios. De hecho, cuando llegó la orden de liberación, Landau no podía mantenerse en pie, y en la prisión recibió alimentos y cuidados adecuados para que pudiera salir por su propio pie. Sus amigos no tuvieron la misma fortuna. Koretz pasó diez años en un campo de trabajos forzados, y Rumer diez años en una *sharashka*.

Pocos meses después de su libertad, y una vez recuperado, Landau y Kora se casaron. En 1946 nació Igor, su único hijo, quien en la edad adulta se dedicó a la física experimental.

LANDAU Y LA SUPERFLUIDEZ

En 1941, Landau publicó un largo artículo titulado «La teoría de la superfluidez del Helio II», que completó seis años más tarde con una breve nota («Sobre la teoría de la superfluidez del Helio II»). Se trata de una teoría fenomenológica, como su teoría sobre las transiciones de fase. En la descripción teórica del fenómeno se incluyen algunas cantidades que no se sabe calcular y sus valores se obtienen de los experimentos.

En su artículo, Landau empieza con una crítica del modelo de Tisza, quien, siguiendo la idea de London, suponía que el He-II se comporta como un gas ideal de bosones. Tisza hablaba de dos ti-

pos de fluidos dentro del helio líquido: uno formado por átomos en estado normal, con energía cero, y otro por átomos en estados excitados. Los primeros se moverían por el líquido sin fricción y serían responsables de la superfluidez. Landau no estaba de acuerdo con este punto de vista.

> Aparte del hecho de que el helio líquido no tiene nada que ver con un gas ideal, los átomos en el estado normal no se comportan como «superfluidos». Al contrario, nada puede impedir a los átomos en el estado normal que colisionen con los átomos excitados, es decir, que al moverse a través del líquido experimenten fricción y dejen de ser superfluidos. Así, la explicación propuesta por Tisza no solo carece de fundamento en sus sugerencias, sino que está en directa contradicción con ellas.

Para Landau, no tiene sentido considerar lo que le sucede a un átomo individual, sino que hay que considerar el líquido como una entidad cuántica. Su argumento principal para explicar la superfluidez es sencillo: si no hay viscosidad, no hay disipación de energía, lo que significa que no se pueden crear «excitaciones elementales» en el líquido. Con esta expresión quiso subrayar que se trata de excitaciones en el líquido como un todo, o excitaciones colectivas, y no de excitaciones de átomos por separado. La energía de excitación del líquido depende, claro está, de la interacción entre sus átomos. Landau fue capaz de describir las excitaciones elementales sin necesidad de entrar en los detalles microscópicos de la interacción.

De manera esquemática, el razonamiento de Landau consta de dos partes. Supongamos que un líquido circula por un capilar con una velocidad $\vec{v}$. Esto significa que se considera el sistema de referencia del laboratorio, en el que el capilar está en reposo y el líquido en movimiento. La primera parte de su razonamiento fue demostrar que para que haya superfluidez, el helio ha de circular por el capilar con una velocidad inferior a cierto valor máximo, determinado por la energía de las excitaciones elementales. Debido a la viscosidad, el flujo disminuye gradualmente a causa de las pérdidas de energía cinética. Estas pérdidas se deben a la fricción

en el seno del líquido y entre el líquido y el capilar. Para caracterizar las pérdidas de energía conviene cambiar de sistema de referencia y considerar que inicialmente el líquido está en reposo y el capilar en movimiento con velocidad $-\vec{v}$. La presencia de la viscosidad significa que el líquido empezará a moverse, pero es evidente que no se mueve de repente todo el líquido. Este movimiento se iniciará a través de cambios graduales en la energía interna del líquido, lo que supone la aparición de excitaciones elementales. Caractericemos estas excitaciones por un momento lineal $\vec{p}$ (que es el producto de la masa por la velocidad), y una energía $e(p)$. En el sistema de referencia considerado, estos son precisamente los valores del momento y la energía del líquido. Ahora hay que volver al sistema de referencia del laboratorio y escribir la energía del líquido. Esta transformación se expresa en los libros de texto, y el resultado en este caso es:

$$E = e(p) + \left(\vec{p} \cdot \vec{v}\right) + \frac{1}{2} M v^2 .$$

El último término es la energía cinética de la masa M del líquido que se mueve con velocidad $\vec{v}$. Por lo tanto, la disipación o pérdida de energía significa que el término $e(p) + (\vec{p} \cdot \vec{v})$ ha de ser negativo. Como la energía de la excitación es positiva, el signo negativo solo se puede conseguir si se cumplen dos condiciones a la vez: que el producto escalar tenga signo negativo (los vectores $\vec{v}$ y $\vec{p}$ paralelos pero de direcciones opuestas, es decir, antiparalelos), y que el valor de la velocidad sea mayor que el valor crítico:

$$v_c = Min \frac{e(p)}{p} .$$

En otros términos, si la velocidad del líquido por el capilar es menor que esta velocidad crítica, no se pueden producir excitaciones elementales en el líquido. Landau insistió en el significado de las excitaciones elementales al escribir en su artículo: «Hay que subrayar que no nos referimos aquí a los niveles de energía de átomos de helio individuales, sino a los niveles correspondientes a los estados de todo el líquido». Si la excitación del líquido fuera como la de un gas ideal, la expresión de la energía sería la de una

partícula de masa m y momento p, es decir $e(p) = \hbar^2 p^2 / 2m$. En tal caso, el valor mínimo para la velocidad crítica es $v_c = 0$, lo que lleva al resultado evidente de que si no hay movimiento no hay pérdidas de energía. Landau rechazaba la interpretación de London y de Tisza porque no tenían en cuenta que las interacciones entre los átomos de helio producen un espectro de excitaciones muy distinto al de un gas ideal de bosones.

En esta primera parte del razonamiento se concluye que si el espectro de excitaciones elementales de un líquido es tal que el mínimo de $e(p)/p$ es distinto de cero, entonces el líquido es superfluido, puesto que no puede haber disipación de energía y momento. Por el contrario, si la velocidad supera este mínimo, pueden crearse excitaciones y desaparece la superfluidez. Volveremos a esta velocidad crítica al final del capítulo.

En este punto, Landau tenía que decir algo sobre la energía de las excitaciones elementales del He-II. En particular, debía averiguar cómo depende la energía de las excitaciones elementales con el momento, lo que en lenguaje técnico se conoce como *espectro de las excitaciones* o *relación de dispersión*. Esta es la segunda parte del razonamiento de Landau, en la que dio muestras de su sorprendente intuición para concebir una relación que años más tarde fue confirmada directamente por los experimentos. Basó su intuición en sus conocimientos sobre hidrodinámica, en donde se considera un tipo de movimiento llamado *potencial* o *irrotacional*, y otro que se llama *rotacional*. No vamos a entrar en su descripción, solo se trata de traer a colación este segundo adjetivo.

Para valores pequeños del momento p, supuso que las excitaciones corresponden a ondas longitudinales, como las ondas de sonido usuales en un líquido compresible con pequeña viscosidad, es decir $e(p) = p\,v_s$, siendo v_s la velocidad de propagación del sonido. Estas excitaciones aparecen también en un sólido, y se conocen como «fonones», nombre que mantuvo Landau. Para valores muy grandes del momento p, es de esperar que la energía sea proporcional a su cuadrado $p^2/2m^*$, como si fuera la de una partícula libre, pues el papel de las interacciones se verá reducido y solo se manifestará en forma de una masa efectiva m^*, que de algún modo refleja el movimiento en un medio. Pero ¿qué sucede en la zona de

valores intermedios del momento? Landau supuso que aparecería otro tipo de excitación, un movimiento rotacional en el interior del líquido, y llamó *rotones* a estas excitaciones. En esto siguió la sugerencia de su colega Igor Tamm, quien había descubierto y dado nombre a los fonones. Para producir un rotón, hace falta una energía mínima, y Landau imaginó que en esta zona de momentos la energía de excitación sería de la forma $\Delta + p^2/2m^*$.

Aunque Landau también se refirió a dos tipos de fluidos que coexisten en el helio líquido, aclaró que no tenía nada que ver con la idea de Tisza.

> Hay que subrayar que considerar el helio como una mezcla de dos líquidos no es más que una manera de hablar, conveniente para describir los fenómenos que tienen lugar en el Helio II. Al igual que cualquier descripción de fenómenos cuánticos en términos clásicos, no es nada adecuada. En realidad, se debe decir que en un líquido cuántico pueden existir simultáneamente dos movimientos [...]. Uno de ellos es normal, es decir, posee las mismas propiedades que los movimientos en los líquidos ordinarios; el otro es superfluido. [...] Insistimos en particular en que no hay división de las partículas reales del líquido entre «superfluidas» y «normales». En cierto sentido, podemos hablar de masas de líquido «superfluidas» y «normales», como masas conectadas con los dos posibles movimientos simultáneos, pero esto no significa la posibilidad de una división real del líquido en dos partes.

La forma del espectro de excitaciones elementales es el elemento esencial para conocer la llamada *función de distribución*. Con ella se pueden calcular los valores medios de cantidades macroscópicas, como la energía o la entropía, que permiten determinar magnitudes directamente medibles. Landau fijó las dos constantes desconocidas Δ y m^* a partir de los valores del calor específico por encima de 1 K, e hizo una serie de predicciones esperando que fueran verificadas posteriormente por los experimentos. Una de ellas se refería a la variación con la temperatura de estos componentes. En un difícil experimento, Élevter Andronikashvili pudo determinar esta cantidad, y aunque confirmó global-

EL EXPERIMENTO DE ANDRONIKASHVILI

La primera verificación y medida experimental de los componentes normal y superfluido en el Helio II se debe al físico soviético E. Andronikashvili. El dispositivo esencial consistía en una pila de discos paralelos, suspendidos de un fino hilo de torsión que pasaba por el centro común (figura 1). Su idea era hacer oscilar el conjunto y medir el período de estas oscilaciones. Este período depende de la masa implicada en las oscilaciones, así que comparando el valor del período cuando el dispositivo está sumergido en el líquido y cuando está en el vacío, se puede deducir la masa de componente normal que es arrastrada en las oscilaciones. En conjunto, este dispositivo experimental muestra la habilidad y el ingenio de Andronikashvili y de todo su equipo de técnicos y artesanos. Apilaron cien obleas de aluminio de 10 micras de espesor (una micra es la milésima parte de un milímetro), separadas entre sí 200 micras. Podemos imaginar la dificultad de colocar las obleas perfectamente paralelas y el hilo de torsión perfectamente perpendicular a las obleas. Lo asombroso es que el experimento funcionó a la primera. En la figura 2 se muestra la proporción del componente normal en el líquido al variar la temperatura.

FIG. 1

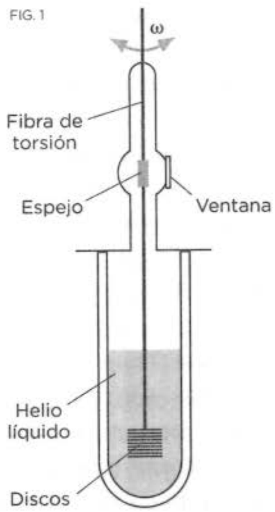
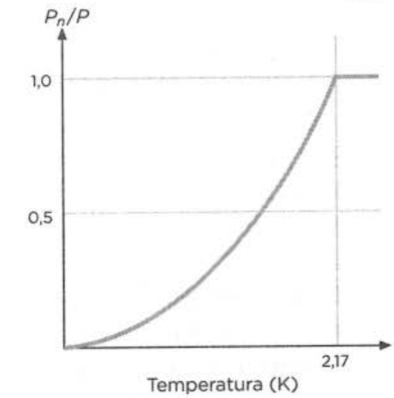


FIG. 2



mente las predicciones de Landau, encontró unas pequeñas discrepancias cuantitativas.

Otra de las predicciones se refiere a la presencia de ondas térmicas en el seno del He-II, a las que se les dio el nombre de

segundo sonido. Es una analogía respecto al sonido ordinario, que consiste en la existencia de ondas de presión. La existencia del segundo sonido fue demostrada en un experimento realizado por Vasili Petrovich Peshkov, pero de nuevo los resultados mostraban un acuerdo global con pequeñas discrepancias. En el segundo de sus artículos, de 1947, Landau mostró que bastaba corregir la expresión inicial para la energía de excitación del rotón: $\Delta + (p - p_0)^2/2m^*$. Con tres parámetros ajustables, el modelo estaba en buen acuerdo cuantitativo con los resultados experimentales.

Landau criticaba las ideas de London y Tisza porque no tenían en cuenta las interacciones entre los átomos de helio. En este sentido, hay que recordar que un condensado de Bose-Einstein en un gas ideal no es superfluido, lo que muestra que las interacciones son fundamentales para que haya superfluidez. Los datos actuales muestran que cerca del cero absoluto, el He-4 es 100% superfluido, pero solo el 10% está en el estado condensado de menor energía.

Landau solo utilizó la función de distribución de bosones para tener en cuenta el carácter bosónico de los átomos de He-4. La teoría microscópica de la superfluidez se debe a los trabajos del físico estadounidense Richard P. Feynman (1918-1988), quien resolvió, con ciertas aproximaciones, la ecuación de Schrödinger, y por tanto tuvo en cuenta de manera explícita la simetría de la función de ondas para bosones. Calculó el espectro elemental de excitaciones del helio, y encontró que cualitativamente era tal y como había intuido Landau. También sugirió que la mejor manera de medirlo directamente es a través de las pérdidas de energía y momento que sufre un haz de neutrones cuando atraviesa una muestra de He-II. El procedimiento, así como el análisis general de Feynman, siguen siendo utilizados en la actualidad para estudiar muchas de las propiedades del helio líquido.

Feynman mostró también que la disipación de energía en el helio líquido se produce en primer lugar por la aparición de vórtices o remolinos, semejantes a los que se forman al vaciar una pila de lavabo llena de agua. Pero hay una diferencia importante en el helio, pues son vórtices cuánticos. Remolinos o vórtices significan

ESPECTRO DE EXCITACIONES ELEMENTALES EN EL HE-II

Landau conjeturó en 1947 la forma del espectro de las excitaciones elementales del He-II, tal como se muestra en la figura 1. Tiene una parte lineal, llamada *zona del fonón*, y una parte parabólica, llamada *zona del rotón*. Son las dos curvas dibujadas con trazo continuo, determinadas a partir de medidas experimentales de la propagación del sonido y del calor específico. Como el espectro ha de ser una curva continua, entre ambas curvas ha de existir un máximo (coloquialmente se habla del *maxón*), que es el de la curva con trazo discontinuo que une las dos anteriores. Este espectro fue determinado en un experimento con neutrones. Se lanza un haz de neutrones sobre una muestra de He-II y se mide la energía perdida en función de su momento, que corresponde a la energía de excitación de la muestra de He-II. La figura de la derecha es una adaptación de los resultados publicados en 1959 por los físicos estadounidenses Yarnell, Arnold, Bendt y Kerr en la revista *Physical Review*.

FIG. 1

Espectro de las excitaciones elementales en el He-II según Landau

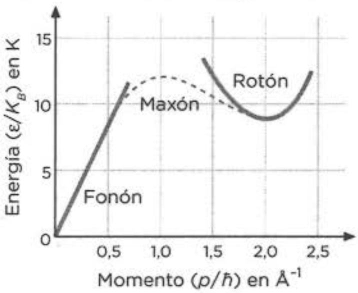
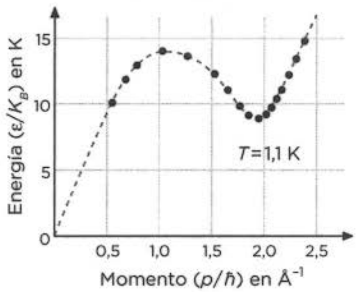


FIG. 2

Espectro de las excitaciones elementales del He-II medidas con neutrones



rotación, es decir, una variación del momento cinético o momento angular del sistema. Al igual que sucede con la energía de excitación de un sistema cuántico, el momento cinético solo puede tomar ciertos valores precisos, múltiplos de la constante de Planck *h*. Se pueden observar los vórtices al poner en rotación un recipiente con helio superfluido. Por debajo de cierta velocidad, el líquido permanece en reposo, porque no se puede alcanzar la energía de excitación adecuada. Al ir aumentando la velocidad, aparecen los vórtices de uno en uno, a medida que el valor del momento angular pasa por múltiplos sucesivos de la constante de Planck.

Landau no tuvo en cuenta la posible existencia de vórtices, entre otras cosas porque no se conocía ni sospechaba su existencia. Su argumento sobre la velocidad crítica por debajo de la cual existe superfluidez, aunque es cualitativamente correcto, no basta para explicar los valores realmente observados. Según el espectro de excitaciones elementales, para valores pequeños del momento transferido, la velocidad crítica es igual a la velocidad del sonido en el líquido, que es de unos 240 m/s. Si los valores del momento están en la región del rotón, el valor de la velocidad crítica es menor, de unos 60 m/s. Pero la formación de vórtices hace que la velocidad crítica sea mucho menor que estos valores, y depende del mecanismo de producción de los vórtices. Sin embargo, se ha podido verificar el criterio de Landau mediante el movimiento de iones negativos dentro del He-II. Se ha observado que estos iones no sufren pérdidas de energía hasta que alcanzan la velocidad de unos 60 m/s, precisamente el valor crítico que corresponde a la excitación de rotones.

CAPÍTULO 4

Los líquidos de fermiones

Así como el He-4 presenta el fenómeno de la superfluidez gracias al carácter bosónico de sus átomos, los líquidos formados por fermiones pueden presentar también un fenómeno semejante, denominado superconductividad en el caso de fermiones cargados, como los electrones. Muchas de sus propiedades se explican mediante la teoría elaborada por Ginzburg y Landau, cuya investigación fue paralela a su participación en el programa nuclear soviético. Landau elaboró también una teoría general para describir los líquidos normales de fermiones.

Un metal está formado por una disposición más o menos regular de átomos, cuyos electrones menos ligados son atraídos y compartidos por todos los demás átomos. Son los denominados *electrones de conducción*, y se mueven aleatoriamente, en cualquier dirección, a través de la red de iones positivos. Al aplicarles un campo eléctrico, aparece un desplazamiento global, superpuesto a este movimiento aleatorio, producido por la corriente eléctrica. Los electrones de conducción se mueven con tanta facilidad que, tras una primera aproximación, se supone que forman un gas ideal, sin interacciones, como hiciera Paul Drude en 1900. Para incluir los efectos cuánticos, Arnold Sommerfeld supuso que se trataba de un gas ideal de fermiones. Este sencillo modelo puede explicar bastantes propiedades de los metales, tanto para la conducción eléctrica como para la conducción de calor.

Pero las interacciones no pueden ignorarse completamente. En su movimiento, los electrones de conducción chocan entre sí y con los iones positivos. Cuanto mayor sea el campo eléctrico aplicado, mayor será el número de choques y más grandes serán las pérdidas de energía, en forma de calor, que puede ser aprovechada en ciertas ocasiones, por ejemplo con una plancha o con un tostador de pan. También se aprovecha para proteger electrodomésticos como lavadoras o lavaplatos de una sobrecarga. Estos aparatos tienen un fusible, compuesto por un hilo conductor de

sección muy fina, de manera que cuando por él circula una corriente de intensidad excesiva, el hilo se calienta tanto que llega a fundirse y se corta la corriente. Pero en general, el calentamiento de los conductores es una pérdida no deseable de energía.

La energía disipada por unidad de tiempo es proporcional al cuadrado de la corriente eléctrica que circula por el conductor, y la constante de proporcionalidad se llama *resistencia del conductor*. Esta depende de la forma del hilo conductor: aumenta cuando lo hace su longitud o disminuye su sección transversal. El coeficiente de proporcionalidad entre la resistencia eléctrica y el cociente entre la longitud y la sección del hilo se llama *resistividad*, y es la magnitud física que realmente importa, porque solo depende de las características del material.

En general, al aumentar la temperatura también lo hacen las vibraciones de los iones positivos y la energía cinética de los electrones de conducción. Habrá por tanto un mayor número de colisiones y una mayor disipación de energía. Por el contrario, la resistividad disminuye con la temperatura. A principios del siglo XX se hicieron experimentos para determinar su valor en el límite del cero absoluto de temperatura. Como la presencia de impurezas en el metal modifica el valor de la resistencia, los experimentos debían realizarse con muestras muy puras.

LA SUPERCONDUCTIVIDAD

Para llevar a cabo experimentos de ese tipo, Kamerlingh Onnes tuvo la idea de utilizar mercurio, un metal que a temperatura ambiente es líquido, y por tanto, resulta fácil eliminar las impurezas mediante destilaciones repetidas. En 1911 propuso a su estudiante de doctorado Gilles Holst que se dedicara a estudiar este problema. Para ello llenó unos tubos capilares con mercurio líquido limpio de impurezas e introdujo en ellos hilos conectados a un circuito eléctrico. Al bajar la temperatura, la congelación del mercurio evitaba la necesidad de hacer soldaduras, con lo que la unión era perfecta. Efectuaba las medidas de la resistencia eléctrica de la muestra en un dispositivo

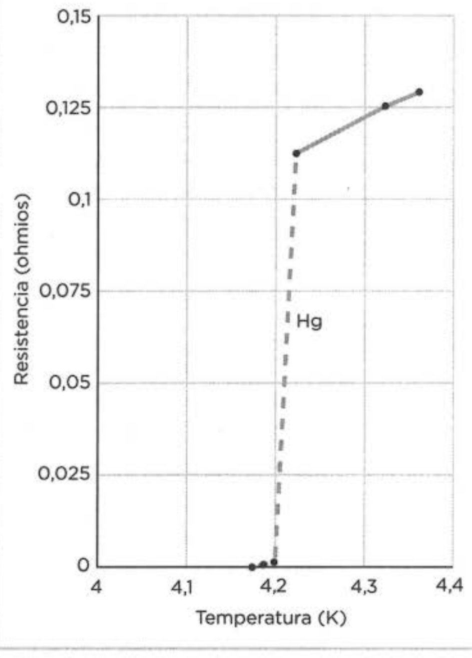
llamado *puente de Wheatstone*, presente en todos los laboratorios de electricidad, como bien saben los estudiantes de física. Con un criostato de helio líquido, medía la temperatura a través de su presión de vapor, que controlaba con una válvula adecuada.

Holst observó que al llegar a 4,2 K la resistencia del mercurio caía bruscamente, lo que le hizo pensar que se había producido un cortocircuito (figura 1). Medidas posteriores descartaron cualquier anomalía y confirmaron estos resultados inesperados. Kamerlingh Onnes escribió un breve artículo con estos resultados:

> [Cuando desciende la temperatura de 4,2 K] en unas centésimas de grado, aparece una brusca caída, llevando la resistencia a menos de una millonésima de su valor original a la temperatura de fusión del mercurio. El mercurio ha pasado a un nuevo estado que, teniendo en cuenta sus extraordinarias propiedades eléctricas, puede llamarse estado supraconductor.

Representación gráfica de las medidas de la resistencia del mercurio en función de la temperatura, realizadas en 1911 por G. Holst.

FIG. 1



Utilizó la palabra neerlandesa *suprageleider*, pero pronto se cambió el prefijo y surgió *superconductor* que, excepto en algunas lenguas como el francés, se ha convertido en el nombre estándar.

Kamerlingh Onnes fue el único autor de este y de otros artículos sobre los superconductores. En todos ellos daba las gracias a Holst por sus meticulosas medidas, así como al soplador de vidrio y al técnico del criostato por su buen trabajo. Esto habría sido motivo de escándalo en nuestros días, pues el nombre del estudiante de doctorado que lleva a cabo el experimento figura como uno de los autores, normalmente en primer lugar. No es de extrañar que Holst no apre-

ciara esta falta de reconocimiento a su trabajo. En 1913 fue contratado por la empresa Philips para instalar y dirigir su laboratorio de investigación en Eindhoven. Solo entonces apareció el nombre de Holst como coautor en algunos de los artículos publicados sobre los superconductores. Más de diez años después, en una carta dirigida a la Real Academia Neerlandesa, Kamerlingh Onnes reconoció el papel relevante que había tenido Holst y recomendaba su elección como académico.

Posteriormente se descubrió que hay otros metales además del mercurio que también son superconductores, como el estaño y el plomo, respectivamente por debajo de 3,7 K y 6 K. Ninguno de ellos es especialmente un buen conductor, y los que sí son buenos conductores, como es el caso del cobre, el oro o la plata, no son superconductores. En 1931 se descubrió que ciertas aleaciones también pueden ser superconductoras, sin que sus componentes lo sean por separado. Ni el oro ni el bismuto son superconductores, al menos en condiciones normales, pero la aleación de oro con un 4% de bismuto es superconductora. Hay otros materiales que son superconductores al aumentar la presión o en forma de láminas muy finas. En todos los casos existe un valor crítico de la temperatura por encima del cual el conductor es normal y no superconductor. Lo mismo sucede si se aplica un campo magnético suficientemente intenso, o si la corriente eléctrica que circula por el superconductor excede de cierto valor. Es decir, existen tres valores críticos T_c, B_c, $\vec{J}_c$ de la temperatura, el campo magnético externo y la densidad de corriente eléctrica por encima de los cuales no existe superconductividad.

La resistividad nula es solo una de las propiedades que caracteriza a un superconductor. En el siglo XIX, el británico James Clerk Maxwell elaboró las ecuaciones que describen las propiedades de los campos eléctricos y magnéticos, y las cargas y corrientes eléctricas, que hoy día se resumen en cuatro famosas ecuaciones. El propio Maxwell las resolvió para el caso hipotético de un conductor perfecto, es decir, con resistividad nula. Encontró que si mediante un campo magnético se indujera una corriente eléctrica, esta se mantendría indefinidamente, y el flujo magnético en su interior sería constante (flujo designa aquí el producto de la intensidad del campo magnético y la superficie transversal del conductor). Parecía

SUPERCONDUCTORES A ALTAS TEMPERATURAS

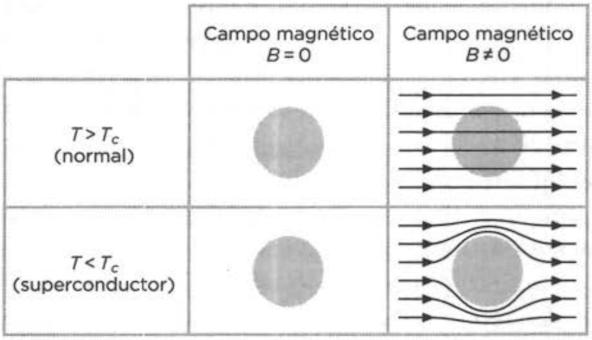

Bednorz (derecha) y Müller trabajando en el laboratorio.

La corriente eléctrica en un superconductor fluye indefinidamente sin ninguna resistencia, sin pérdidas de energía. Para ser precisos, sí que hay que hacer un consumo de energía, pero no para mantener la corriente, sino para mantener el conjunto a una temperatura por debajo de la crítica. De ahí el interés en buscar, si existen, materiales superconductores con temperaturas críticas altas, idealmente superiores a la temperatura ambiente. Pero a la presión atmosférica, la mayor temperatura crítica es la del niobio (unos 9 K). En 1986, Johannes Georg Bednorz y Karl Alexander Müller descubrieron, en el laboratorio de IBM en Zúrich, que la temperatura crítica de un material cerámico formado por un óxido múltiple de lantano, bario y cobre ($BaLa_2CuO_4$) era de 38 K. Unos meses después llegaron a los 92 K al añadir itrio a dicho óxido ($YBa_2Cu_3O_7$). Este resultado fue un verdadero punto de inflexión, pues dio comienzo a la era de la superconductividad a altas temperaturas: ahora se usa nitrógeno (cuyo punto de ebullición es de 77 K) en lugar de helio. Por ese descubrimiento Bednorz y Müller recibieron el premio Nobel de Física de 1987. Desde entonces se han descubierto otros superconductores a altas temperaturas, hasta llegar a los 135 K en el caso del material $HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$, la mayor temperatura crítica a presión atmosférica. Aún no se entiende por qué son tan especiales estos materiales, ni tampoco existe una teoría de la superconductividad a altas temperaturas.

natural asociar superconductor y conductor perfecto. Para verificarlo, se hicieron experimentos colocando un superconductor en un campo magnético. Aunque las primeras medidas parecían indicar que el campo magnético en su interior era constante, había dudas sobre su fiabilidad. Los resultados dependían del orden en que se hiciera el enfriamiento y se aplicara el campo magnético. Tampoco eran medidas fácilmente reproducibles, pues la presencia de impurezas alteraba los resultados.

EFECTO MEISSNER-OSCHENFELD

¿Qué sucede cuando a un material superconductor se le aplica un campo magnético externo? En las dos figuras superiores se representa el caso de la fase normal (a temperatura mayor que su valor crítico). Las líneas del campo magnético simplemente penetran en el material. Pero cuando se enfría por debajo de la temperatura crítica (dos figuras inferiores), el campo magnético es expulsado por el superconductor, como se ilustra por la concentración de las líneas de campo. Esta expulsión se observa igualmente cuando se aplica el campo magnético a la fase normal y a continuación se enfría para llegar a la fase superconductora.



El experimento definitivo fue realizado en 1933 en Berlín por los alemanes Walter Meissner y Robert Ochsenfeld y, casi simultáneamente, por Shubnikov en Járkov. El resultado fue inesperado: el campo magnético no queda «congelado» en el interior del superconductor, sino que es expulsado, sin que importe el orden en que se proceda al variar la temperatura o aplicar el campo magnético. Este resultado se conoce como efecto Meissner-Ochsenfeld o, más simplemente, efecto Meissner. Recordemos que cuando se coloca en un campo magnético una sustancia diamagnética, esta produce otro campo que se opone al externo, en mayor o menor grado. Por tanto, un superconductor es una sustancia diamagnética perfecta, pues produce un campo que anula exactamente el campo magnético externo.

Como es de suponer, hubo muchas ideas, algunas muy llamativas, para intentar explicar la superconductividad. Pero como

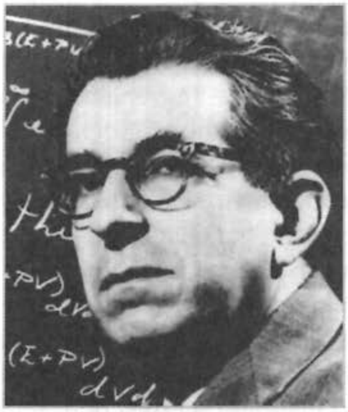
decía Felix Bloch con cierta sorna y desespero, el único teorema que se podía demostrar rigurosamente era que cualquier idea sobre la superconductividad era falsa. El primer paso con resultados tangibles fue dado en 1935 por los hermanos Fritz y Heinz London. Recordemos que Tisza había propuesto un modelo de dos fluidos para explicar la superfluidez del He-II. Los London proponían ahora algo parecido, al suponer que una fracción de los electrones de conducción de un metal se convertía en superconductor. Cuando resolvieron las ecuaciones de Maxwell para estos dos «fluidos» encontraron resultados interesantes, que podían ser verificados en los experimentos. Obtuvieron una ecuación que relaciona la corriente eléctrica en el superconductor con un campo magnético. De ella dedujeron el efecto Meissner, y vieron que la expulsión del campo magnético no es completa, sino que este penetra cierto espesor de la superficie, relacionado con la densidad de los electrones superconductores. Más tarde Fritz London sugirió una analogía entre la corriente en una espira superconductora y las órbitas de los electrones en un átomo. En este caso, los electrones no emiten energía porque sus posibles movimientos están restringidos a ciertos valores discretos, que caracterizan las órbitas estacionarias. De igual manera, pensó London, tampoco disipa energía la corriente eléctrica en una espira superconductora, lo que debe considerarse como un fenómeno cuántico a escala macroscópica.

La investigación sobre la superconductividad se interrumpió durante la Segunda Guerra Mundial. En los países en conflicto, la mayoría de científicos se dedicó a la investigación con propósitos militares, como el radar, los explosivos o la energía nuclear. Landau trabajó en el programa nuclear de la URSS durante algunos años, incluso después de acabada la guerra.

EL PROYECTO NUCLEAR SOVIÉTICO

El descubrimiento del neutrón por J. Chadwick en 1932 fue la pieza que faltaba para entender la estructura del núcleo. Hasta entonces se pensaba que el núcleo atómico estaba constituido por

FRITZ WALTER LONDON (1900-1954)



London nació en Breslau (actualmente, Wroclaw, Polonia). Estudió filosofía en Múnich, pero después de doctorarse en 1921, decidió dedicarse a la física teórica con Sommerfeld. En 1927 fue asistente de Schrödinger en Zúrich y posteriormente en Berlín. Su primera aportación importante a la física la realizó en Zúrich, con Walter Heitler. Se trata de la explicación cuántica del enlace químico, lo que dio origen a la nueva disciplina de la química cuántica. Debido a las leyes raciales de los nazis fue cesado de su puesto en la Universidad de Berlín y encontró refugio en Inglaterra y Francia, hasta que en 1939 emigró a Estados Unidos. Fue profesor de la Universidad de Duke (Carolina del Norte) hasta el final de su vida.

Los superconductores

Sugirió que la superfluidez del helio líquido está relacionada con su carácter bosónico, de manera análoga a la condensación de Bose-Einstein. Junto con su hermano Heinz (1907-1970), estudió las propiedades de los superconductores. A partir de las llamadas *ecuaciones de London* estudiaron sus propiedades electromagnéticas, y dedujeron que el campo magnético penetra un cierto espesor en un superconductor, que se llama *longitud de London*. En 1957 se instituyó el Premio en memoria de Fritz London, o «medalla London». Se concede en el Congreso Internacional de Física de Bajas Temperaturas para premiar las contribuciones más significativas en este campo. Landau recibió este premio en 1960. El físico estadounidense John Bardeen, uno de los pocos científicos galardonados con dos premios Nobel, dedicó el dinero de su segundo Nobel para financiar esta medalla y promover otras iniciativas dedicadas a recordar a Fritz London.

protones, de carga eléctrica positiva, y electrones, de carga negativa. Ivanenko propuso enseguida la imagen del núcleo como un sistema de protones y neutrones. También se sugirió utilizar el neutrón para explorar el interior de los núcleos pues, al contrario del protón, no sufre repulsión eléctrica alguna al acercarse al núcleo. Pero los experimentos que se realizaron en este sentido llevaron a un descubrimiento de implicaciones insospechadas. En

Berlín, a finales de 1938, Otto Hahn y Fritz Strassmann descubrieron que al bombardear uranio con neutrones se producía bario, lo que fue interpretado por Lise Meitner y Otto Frisch como un fenómeno de rotura del núcleo, al que dieron el nombre de *fisión nuclear*. En este proceso se libera una gran cantidad de energía, típicamente un millón de veces mayor que en una reacción química. Además, por cada fisión de un núcleo de uranio se producen entre 2 y 3 neutrones, que pueden a su vez producir una nueva fisión, en un proceso en cadena. Se vio enseguida el interés de la energía nuclear para usos civiles y, sobre todo, en medio del ambiente prebélico existente, para usos militares.

En agosto de 1939 se firmó un pacto de no agresión entre la URSS y Alemania. Un mes después, Alemania invadió Polonia, dando comienzo así a la Segunda Guerra Mundial. La URSS ocupó Estonia, Letonia, Lituania y parte de Polonia, e inició una guerra contra Finlandia. Este pacto fue roto en junio de 1941, cuando el ejército alemán invadió la URSS. En pocos meses, una gran extensión de territorio fue ocupado, amenazando con tomar Leningrado y Moscú. En el invierno de 1942-1943, la batalla de Stalingrado cambió el curso de la contienda, y en la primavera de 1943 el Ejército Rojo ya había reconquistado gran parte del territorio invadido. Se estima que en esta guerra, la URSS perdió más del 12% de su población.

Al iniciarse la guerra, Alemania era el único país con un programa militar para aprovechar la energía nuclear, pero Gran Bretaña, Estados Unidos, Japón y la URSS no tardaron en hacer lo propio. Gran Bretaña y Estados Unidos acabaron por unir sus programas en el Proyecto Manhattan. En el verano de 1943 se inició la construcción de bombas atómicas en las instalaciones secretas de Los Álamos, Nuevo México. Como es sabido, el resultado fue el bombardeo de Hiroshima y Nagasaki en agosto de 1945.

Los científicos soviéticos se dedicaron a la fisión nuclear al mismo tiempo que sus homólogos en los demás países, y por los mismos motivos que estos. En agosto de 1940 se creó una comisión para analizar la viabilidad de la energía nuclear para usos militares. A diferencia de Alemania y Estados Unidos, la URSS no disponía de mineral de uranio en grandes cantidades, pues apenas se cono-

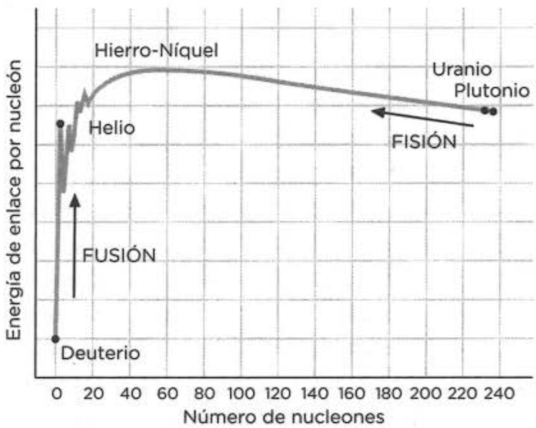
cían los recursos mineros del país. En octubre de 1941, ya iniciada la invasión alemana, Kapitsa escribió en el diario *Pravda* un artículo sobre la energía nuclear. En él destacaba los obstáculos técnicos existentes y los enormes recursos necesarios para la producción de energía atómica. En efecto, el primer problema técnico de envergadura era la separación de los dos isótopos del uranio natural, ya que la fisión se produce con el uranio-235, el más ligero de ellos.

Las investigaciones soviéticas sobre la fisión nuclear fueron abandonadas durante un tiempo debido a la invasión alemana. En septiembre de 1941, el Comité Estatal de Defensa, presidido por Stalin, ordenó que no fueran enviados al frente aquellos científicos que pudieran hacer investigación importante para la defensa, como el radar, blindaje y protección, desmagnetización de barcos, etcétera. La mayoría de los centros científicos fueron evacuados a zonas más seguras, y el IFP se trasladó a Kazán, a unos 450 km al este de Moscú. Landau se dedicó a estudios como la detonación de distintos tipos de explosivos, la velocidad de flujo de los productos resultantes en las explosiones, o los efectos de las ondas de choque a grandes distancias del lugar de su producción.

Los soviéticos, al igual que los aliados occidentales, no tenían información concreta del programa nuclear alemán, pero sí conocían muchos detalles del programa aliado a través de una red de informadores y espías. En marzo de 1942 supieron que los británicos habían decidido iniciar la construcción de una bomba de uranio. En septiembre de 1942, Molotov, entonces vicepresidente de la comisión estatal de defensa, pasó a dirigir el proyecto dedicado al estudio de la viabilidad de una bomba, y nombró como director científico a Igor V. Kurchatov (1903-1960). En febrero de 1943 se creó el «Laboratorio N.º 2» en la periferia de Moscú. Kurchatov pidió que Landau fuera adscrito al proyecto por sus conocimientos en campos relevantes, como física nuclear, dinámica de gases y física cinética. En su petición explicaba que la explosión produciría una ionización total de la materia, en un estado que en teoría solo existe en las estrellas, y que Landau «es un especialista y un brillante experto en este tipo de cuestiones». Ante la falta de respuesta, Kurchatov volvió a insistir en noviembre de 1944. La participación de Landau «sería muy útil para resolver los profundos problemas

FISIÓN Y FUSIÓN DE LOS NÚCLEOS

En la figura se representa la energía de enlace por nucleón de los núcleos atómicos (no importa ahora especificar las unidades), en función del número de nucleones que los forman. Es la energía que, en promedio, hace falta para separar un protón o un neutrón del núcleo. Cuanto mayor sea esta energía, más estable será el núcleo en comparación con sus vecinos; la máxima estabilidad se alcanza en la zona del hierro y del níquel. En principio, se puede liberar energía al acercarse a esta zona desde los dos extremos, o bien fisionando un núcleo pesado, como el uranio y el plutonio, en núcleos más pequeños, o bien fusionando dos núcleos ligeros, como el hidrógeno o el deuterio, para formar un núcleo de masa mayor, como el helio. La fusión es el proceso que produce la energía en el interior del Sol. La energía liberada en la fisión nuclear es enorme, típicamente un millón de veces mayor que la liberada en un proceso químico, y en los años de la guerra mundial llevó a la construcción de la bomba atómica. Un artefacto explosivo basado en la fusión libera una energía aún mayor, y dio origen a la bomba H (por hidrógeno) o bomba termonuclear (por la enorme temperatura que hay que alcanzar durante el proceso, la cual se consigue mediante una bomba atómica). Hasta el momento, la producción de energía para usos civiles se basa en la fisión del uranio en las centrales nucleares. Aún están lejos de resolverse los problemas técnicos de la fusión, que en principio es una fuente más limpia que la fisión nuclear.



físicos que conciernen a los procesos fundamentales que tienen lugar en un átomo de uranio». Sin duda, seguían pesando sus antecedentes como enemigo del pueblo y tampoco hubo respuesta.

Las cosas cambiaron en agosto de 1945. Las bombas nucleares lanzadas por Estados Unidos sobre Hiroshima y Nagasaki convirtieron el proyecto nuclear soviético en un objetivo estratégico prioritario. Se creó una nueva Comisión Especial, a cuyo frente estaba Beria, el máximo responsable del NKVD. Kapitsa y Kurchatov eran los únicos físicos que formaban parte de esta comisión. Pero Kapitsa era consciente de que no tenía los conocimientos adecuados, y a los pocos meses escribió a Stalin para pedirle que le relevara de su puesto. Siguiendo su costumbre, también opinó sobre el proyecto y sobre Beria, de quien dijo que no era la persona más idónea para dirigirlo. Esto último fue muy arriesgado, pues Kapitsa había tenido diferencias serias con Beria en relación con la producción industrial de oxígeno líquido. Kapitsa fue cesado y pocos meses más tarde fue depuesto de todos sus cargos oficiales y científicos, en medio de una campaña denigratoria en la que se criticó sobre todo su labor en la producción de oxígeno. Permaneció confinado nueve años en su *dacha*, hasta su rehabilitación en 1955. Durante estos nueve años solo recibió las visitas de los pocos amigos y colaboradores que no temían mostrarle su apoyo. Landau solía ir a verlo una vez al mes.

En diciembre 1945, Kurchatov volvió a escribir a Beria:

> Le pido que autorice a que el Laboratorio N.º 2 invite al profesor Landau a participar en la investigación teórica mencionada, así como a las reuniones del seminario del laboratorio.

En febrero de 1946, el consejo técnico de la comisión especial del comité estatal de defensa aprobó que Landau participara en el proyecto nuclear, con la misión de realizar los cálculos oportunos «para verificar modelos de los productos de la fábrica». Estos productos, como habrá adivinado el lector, eran los artefactos nucleares. Algunos historiadores y muchos físicos soviéticos opinan que el papel de los físicos en el programa nuclear salvó a la física soviética del tipo de ataques ideológicos que sufrió la genética en la URSS.

Landau no tenía ningún interés en el proyecto, pero no tuvo más remedio que aceptar. Lo contrario habría sido una imprudencia, en vista de sus antecedentes y con su valedor Kapitsa caído en desgracia. Se consideraba un «esclavo científico», obligado a trabajar en

temas militares, que le alejaban de la investigación científica. No tenía acceso a las instalaciones del Laboratorio N.º 2, y debía realizar sus cálculos en su despacho del IFP guardando el máximo secreto. Uno de los resultados más importantes fue lo que Landau llamaba *teoría de la eficiencia*, pero quienes construían el artefacto atómico denominaban más gráficamente *las fórmulas de Landau*. Se trataba de calcular la energía liberada y cómo se distribuía en una zona alrededor del punto de la explosión. Entonces solo se disponían de reglas de cálculo para resolver ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. Las cuestiones ideológicas retrasaron el desarrollo en la URSS de lo que en aquellos años se llamaba *cibernética*. Landau y su grupo fueron capaces de dar soluciones analíticas aproximadas, a partir de consideraciones generales de hidrodinámica nuclear, que contenían unos pocos parámetros ajustables. Una vez determinados estos, se podían aplicar las fórmulas a situaciones reales, como la información disponible sobre las bombas estadounidenses, encontrando un acuerdo más que satisfactorio. Durante varios años, los diseños soviéticos se apoyaron en las fórmulas de Landau. La primera bomba soviética explotó el 29 agosto de 1949, en las estepas de Kazajistán. Se trataba de una bomba de plutonio, construida según la información conseguida por los espías del Proyecto Manhattan.

Landau también participó en el proyecto de la bomba de hidrógeno o termonuclear. Está basada en la fusión de núcleos muy ligeros, y la energía liberada es unas mil veces mayor que la de una bomba atómica basada en la fisión de núcleos pesados. Hace falta, sin embargo, alcanzar temperaturas de decenas de millones de grados (como la que existe en el interior del Sol) para iniciar la fusión. El primer ensayo termonuclear de Estados Unidos, en noviembre de 1952, presionó a los integrantes del proyecto termonuclear soviético, cuyo director científico era Sájarov. Los trabajos de Landau consistían en estimaciones de la potencia liberada, elaboración de métodos numéricos eficientes para integrar ecuaciones diferenciales, estudios relacionados con el plasma, etcétera. En marzo de 1953 murió Stalin, y Landau abandonó el proyecto sin tardanza. En agosto de 1953 se hizo la primera explosión soviética de una bomba de hidrógeno. Landau rechazó las invitaciones posteriores para que se reintegrara en el proyecto nuclear.

LA TEORÍA DE GINZBURG-LANDAU

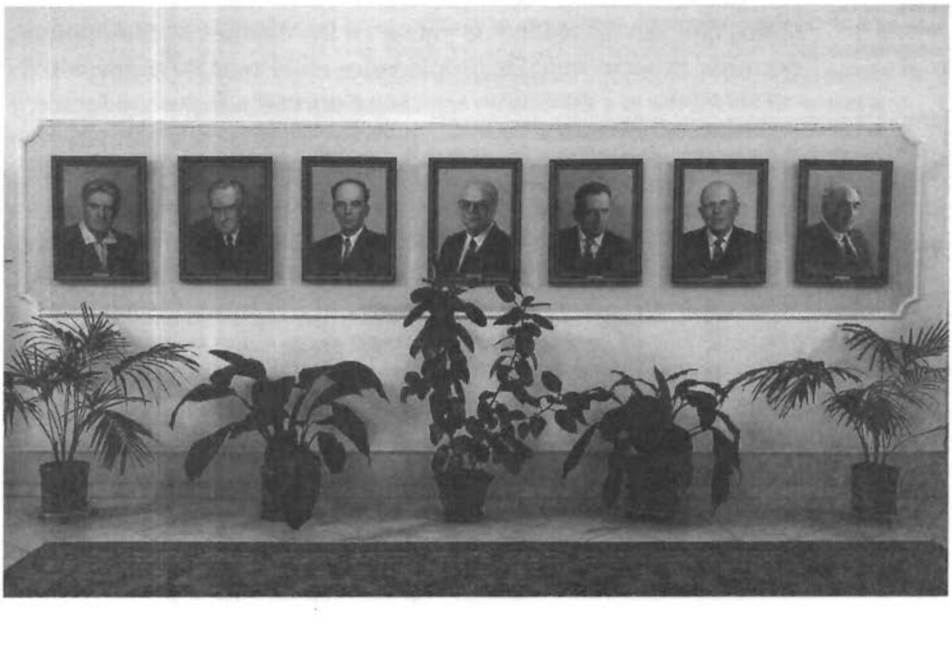
A pesar de su dedicación al proyecto nuclear, Landau continuó con sus investigaciones básicas, y se interesó por los superconductores. De igual modo que se distinguen las fases sólido-líquido-vapor en una sustancia, o las fases normal y magnética en un imán, también hay que distinguir entre las fases normal y superconductora de un metal. La teoría de Landau sobre las transiciones de fase era la manera más directa de estudiarlas. Recordemos que esta teoría se basa en la existencia de un parámetro de orden, cuya elección es uno de los aspectos delicados. Landau hizo un primer intento fallido al escoger la densidad de la corriente superconductora, y dejó de lado el problema. En 1949, Vitali L. Ginzburg renovó su interés por el asunto. En esos años Ginzburg también participaba en el proyecto nuclear soviético, sin moverse de su despacho del Instituto Lébedev. Por razones distintas a Landau, tenía vedado el acceso al Laboratorio N.º 2. Ninguno de los dos sabía o imaginaba que el otro también estaba implicado en la bomba termonuclear.

En su trabajo sobre la superconductividad, decidieron que el parámetro de orden tenía que estar relacionado con una función de ondas «efectiva» Ψ (letra griega psi) de los «electrones superconductores». Como toda función de ondas, Ψ es una función compleja, y el cuadrado de su módulo $|\Psi|^2$ tiene que ver con una densidad. En este caso, se trata de la densidad n_s de los electrones superconductores. El parámetro Ψ depende de la temperatura T, y se anula cuando la temperatura iguala o supera su valor crítico T_c, lo que refleja que no hay electrones superconductores por encima de la temperatura crítica. El paso siguiente fue escribir la energía en función del parámetro de orden. De manera precisa, conviene utilizar la densidad de energía libre (es decir, su valor por unidad de volumen) que hace intervenir explícitamente la temperatura. De acuerdo con la teoría de Landau para las transiciones de fase, supusieron que la diferencia de energías entre las fases superconductora y normal varía suavemente con el parámetro de orden (figura 2, pág. 132). Como este es complejo y la energía libre es real, ha de depender solo del módulo del parámetro de orden,



FOTO SUPERIOR:
Landau conversa con su buen amigo Kapitsa en Nikolina Gora en 1948, donde este último estuvo recluido durante nueve años tras su caída en desgracia por enfrentarse con Beria, el jefe de la policía secreta soviética.

FOTO INFERIOR:
Sala del Instituto Lebedev de Física con los retratos de los científicos laureados con el Nobel que trabajaron en sus instalaciones (de izquierda a derecha): Cherenkov, Tamm, Frank, Basov, Prójorov, Sájarov y Ginzburg.



Si la temperatura es inferior al valor crítico, el mínimo de la diferencia de energías libres se obtiene para un valor del parámetro de orden distinto de cero. Por el contrario, si la temperatura es superior a la crítica, es decir, en el estado normal, el mínimo se alcanza cuando el parámetro de orden es igual a cero. Como este parámetro es una función compleja, hay que imaginar la figura haciendo una rotación completa respecto del eje vertical, lo que significa que el resultado solo depende de su módulo, y es independiente del valor de la fase.

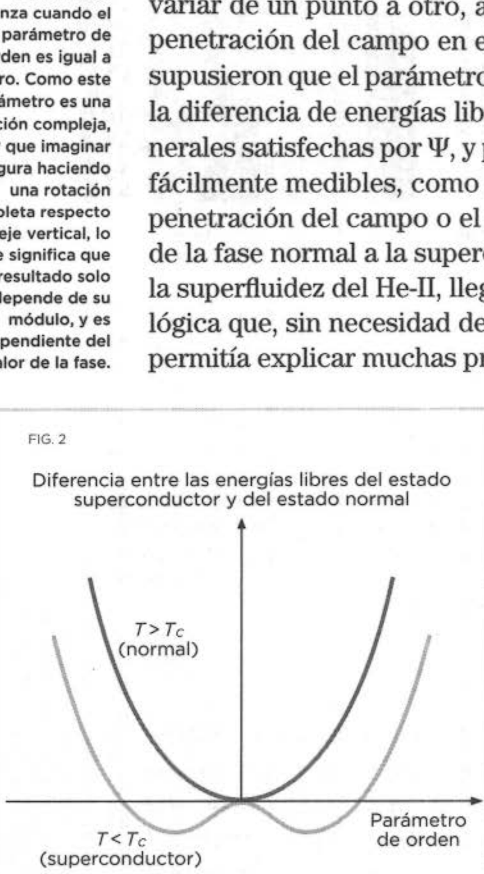
y es más adecuado escribirla en función del módulo al cuadrado, que se identifica con la densidad de electrones superconductores, de la siguiente manera:

$$f_s - f_n = a(T)|\psi|^2 + \frac{1}{2}b(T)|\psi|^4.$$

Recordemos que f_s y f_n representan las energías de la fase superconductora y la fase normal, respectivamente. Hay dos coeficientes desconocidos, *a(T)* y *b(T)*, que dependen de la temperatura. Esta ecuación aún no está completa, pues hay que incluir un campo magnético y considerar que el parámetro de orden puede variar de un punto a otro, algo necesario para poder describir la penetración del campo en el superconductor. Ginzburg y Landau supusieron que el parámetro de orden físico es el que hace mínima la diferencia de energías libres. Obtuvieron así las ecuaciones generales satisfechas por Ψ, y pudieron calcular diversas magnitudes fácilmente medibles, como el calor específico, la profundidad de penetración del campo o el espesor de material en el que se pasa de la fase normal a la superconductora. Al igual que en el caso de la superfluidez del He-II, llegaron a elaborar una teoría fenomenológica que, sin necesidad de entrar en los detalles microscópicos, permitía explicar muchas propiedades en la zona de transición de metal normal a superconductor, y proporcionaba una valiosa guía para los experimentos.

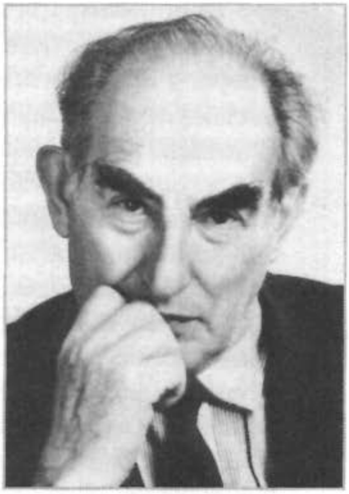
FIG. 2

Diferencia entre las energías libres del estado superconductor y del estado normal



El trabajo fue publicado en 1950 en *Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki*, conocida como *Soviet Physics JETP* en su versión en inglés. Las revistas científicas soviéticas más importantes hacían una versión en inglés para su difusión fuera de la URSS, pero este número tuvo un destino imprevisto. La guerra fría entre los dos bloques llegó a un punto álgido tras el primer ensayo

VITALI LAZAREVICH GINZBURG (1916-2009)



Ginzburg fue un físico teórico soviético. En 1938 se graduó en la Facultad de Ciencias Físicas de Moscú, su ciudad natal. En 1940 obtuvo el grado de candidato a doctor y en 1942 el grado de doctor. Trabajó desde 1940 en el Instituto Lebedev de Física de Moscú, de la Academia de Ciencias de la URSS. Entre los años 1971 y 1988 sucedió a Igor Tamm al frente del Departamento Teórico. En 1945 consiguió la plaza de profesor a tiempo parcial en la Universidad Estatal de Gorki y en 1968 en el Instituto Físico-Técnico de Moscú. Siempre dijo que tuvo dos maestros: Tamm y Landau. El primero fue su director de tesis, y el segundo fue su interlocutor crítico preferido.

El proyecto termonuclear soviético

Al finalizar la Segunda Guerra Mundial, trabajó en el proyecto termonuclear soviético, en el que hizo la crucial propuesta de reemplazar la mezcla de deuterio y tritio (los dos núcleos ligeros que se fusionan) por un compuesto más manejable de deuterio y Litio-6, en forma de deuteruro de litio. Mostró que al ser bombardeado con neutrones, el litio produce el tritio necesario para la fusión. Sus campos de trabajo incluyen la materia condensada, la física de plasmas y la astrofísica. En materia condensada destacan sus contribuciones a la teoría de la superconductividad (teoría de Ginzburg-Landau), transiciones de fase y ferroelectricidad. En la física de plasmas, contribuyó también a la teoría de propagación de ondas, la emisión sincrotrón y la radiación de transición; y en astrofísica, elaboró una teoría sobre el origen de los rayos cósmicos y la teoría de emisión de radio de los púlsares. Recibió el premio Nobel de Física de 2003, compartido con Alekséi Alekséyevich Abrikósov y Anthony James Leggett, «por sus contribuciones pioneras sobre la superconductividad y la superfluidez».

atómico soviético en 1949 y el inicio de la guerra de Corea en 1950. En Estados Unidos hubo una violenta campaña anticomunista, protagonizada por el senador McCarhty. Al calor de esta campaña y como muestra de su patriotismo, los estibadores del puerto de Nueva York decidieron boicotear los envíos de publicaciones so-

viéticas, de manera que el trabajo de Ginzburg y Landau acabó en el fondo del río Hudson, y durante varios años su teoría fue desconocida fuera de la URSS.

La primera teoría microscópica de la superconductividad apareció en 1957. Fue obra de los estadounidenses John Bardeen, Leon Cooper y Robert Schriefer, y se conoce como teoría BCS, por las iniciales de sus autores. Cooper había dado el primer paso en 1956. Consideró un par aislado de electrones en un metal, y demostró que la configuración de menor energía sucede cuando los dos electrones tienen momentos opuestos, es decir, cuando forman un par con momento total nulo. Ahora bien, dado que los electrones se repelen, hace falta una atracción para que el par sea estable. El paso siguiente fue mostrar que dicha atracción se debe a la interacción entre los electrones y las vibraciones de la red de iones positivos, lo que en lenguaje técnico se llama la *interacción electrón-fonón*. La última etapa fue construir la función de ondas de los pares de electrones. Estos pares forman una entidad de espín cero, así que puede decirse que el estado superconductor es equivalente al estado superfluido con bosones de espín cero, que son los pares de electrones. Todos ellos forman una unidad colectiva gigante, en el que las funciones de onda individuales tienen la misma fase. La función BCS es una muy buena aproximación que explica las características básicas de los superconductores. Con ella se pudieron calcular diversas cantidades termodinámicas y predecir resultados que se confirmaban razonablemente con los experimentos. Los tres científicos recibieron el premio Nobel de 1972 por la teoría BCS. Este fue el segundo premio Nobel para Bardeen, que compartió con Walter Houser Brattain y William Bradford Shockley el de 1956 por el descubrimiento del efecto transistor.

La teoría macroscópica de Ginzburg-Landau es muy distinta de la teoría microscópica BCS. Sin embargo, en 1959, Lev Gorkov demostró que las ecuaciones de Ginzburg-Landau se pueden obtener de la teoría BCS. A pesar de no describir la superconductividad en términos de los electrones y sus interacciones, ni siquiera la formación de pares, la versión de Ginzburg-Landau permite obtener de modo sencillo muchos de los aspectos importantes de este fenómeno.

LOS LÍQUIDOS NORMALES DE FERMI

Es muy sorprendente que muchas de las propiedades de los metales puedan explicarse suponiendo que los electrones de conducción son un gas ideal de fermiones, a pesar de que estos electrones interaccionan entre sí y con los iones de la red. Landau no estaba satisfecho con este modelo, porque «no aclara qué propiedades del modelo del gas corresponden a la realidad y cuáles son intrínsecas al propio gas». Entre 1956 y 1958, Landau desarrolló su teoría de los líquidos de Fermi. El calificativo de normales se le dio más tarde para subrayar que en ella no se consideran fenómenos como la superconductividad o la superfluidez, que, como sabemos, requieren elementos adicionales para explicar la formación de pares.

Conviene primero considerar un gas ideal de fermiones idénticos, de masa m y espín 1/2, contenido en un volumen V. Cada fermión se caracteriza por su momento p, con energía asociada $p^2/2m$, y, debido al principio de Pauli, no puede haber más de dos fermiones con el mismo valor del momento. En el estado de menor energía, o estado fundamental, todos los valores están ocupados hasta un valor máximo, llamado *momento de Fermi* p_F, o *momento del nivel de Fermi*. Dicho valor depende del número n de fermiones por unidad de volumen, y la relación entre ambas cantidades es:

$$p_F/\hbar = 3(\pi^2 n)^{1/3}.$$

Se llama *energía de Fermi* al valor $p_F^2/2m$, que es el valor máximo de la energía de un fermión. Podemos ver que esta energía es proporcional a $\hbar^2 n^{2/3}/m$, al igual que la temperatura de condensación de Bose-Einstein o la estimación de la energía de punto cero a partir del principio de indeterminación. No tiene nada de sorprendente, pues es una cuestión de análisis dimensional: esta combinación es la única expresión con dimensiones de energía que se puede construir con la constante de Planck, con una masa y con una densidad de partículas. Las distintas energías mencionadas difieren en un factor sin dimensiones.

Una vez conocido el espectro de excitaciones elementales, se pueden determinar las propiedades de equilibrio del sistema, de

modo semejante al caso de los bosones. Para obtener el espectro, Landau partió de un gas ideal de fermiones, que tan buenos resultados da para los metales, y supuso que, en presencia de interacciones, la clasificación de niveles no varía de manera significativa. Las partículas sin interacción pasan a ser lo que Landau llamó *quasi-partículas* o *excitaciones elementales*. Landau quiso mantener dos cosas de la imagen del gas perfecto: que los niveles de energía del líquido se clasifican mediante el momento de las partículas, y que existe la misma relación entre el momento de Fermi y la densidad de partículas. En un gas ideal, la energía total del sistema es la suma de las energías cinéticas individuales, pero esta propiedad deja de ser cierta en un líquido, ya que hay que tener en cuenta la interacción entre las quasi-partículas. Landau se propuso caracterizar esta interacción de manera fenomenológica.

Las excitaciones de menor energía hacen intervenir a los fermiones que están próximos al nivel de Fermi. Puesto que todos ellos tienen el mismo valor del momento p_F y más de dos fermiones no pueden tener el mismo valor del momento, la diferencia de momentos en este nivel está en la orientación del vector correspondiente. Por lo tanto, la interacción entre ellos solo dependerá del ángulo que formen o, más exactamente, del coseno del ángulo por cuestiones de simetría. La interacción queda caracterizada por unos pocos parámetros, que llamamos *parámetros de Landau*. La interacción se puede escribir de manera muy sencilla como $f_0 + f_1 \cos\theta + \ldots$, más una expresión análoga para tener en cuenta el espín de los fermiones, lo que duplica el número de parámetros. Pues bien, solo con dos o cuatro de estas constantes se puede conseguir una mejor descripción de las propiedades del líquido en comparación con el modelo del gas. Landau mostró que estas constantes se relacionan con magnitudes del sistema tales como la velocidad del sonido, la susceptibilidad magnética o el calor específico, que son fácilmente medibles.

EXPERIMENTOS CON ÁTOMOS DE HE-3

Como ejemplo, Landau consideró el caso del sistema formado por átomos de He-3. Su abundancia en el helio natural es del orden de

un átomo entre un millón, y hasta 1939 no se tuvo la certeza de que el He-3 es un isótopo estable. Los primeros experimentos se hicieron a partir de 1948, cuando se pudo disponer de gas en pequeñas cantidades. El He-3 que se utiliza es sobre todo un subproducto de la bomba de hidrógeno, que requiere tritio (el isótopo del hidrógeno con un protón y dos neutrones). El tritio es inestable y se desintegra en He-3, que se escapa en forma de gas. Recientemente se han encontrado aplicaciones al He-3 de interés estratégico. A pesar de su interés fundamental, su precio es en la actualidad prohibitivo para los laboratorios de investigación básica, lo que ha frenado los estudios sobre este líquido.

El punto de ebullición del He-3 es de 3,2 K, y permanece en estado líquido hasta el cero absoluto de temperatura. Durante más de veinte años, los intentos de observar su fase superfluida no dieron resultado alguno, lo que parecía confirmar que esta era una propiedad exclusiva de los bosones. Pero en cualquier caso, era evidente que el He-3 es un líquido cuántico formado por fermiones, que debía mostrar propiedades diferentes respecto del líquido de bosones. Algunos de los parámetros de Landau pudieron determinarse a partir de sus propiedades medidas. Landau dedujo el espectro de excitaciones elementales del He-3, que es algo más complicado que el espectro bosónico. Esto le permitió predecir la existencia de un modo de excitación, llamado *sonido cero*, que fue observado en experimentos con neutrones, similares a los que midieron el espectro del He-4.

De alguna manera, tal como intuyó London, la superconductividad es análoga a la superfluidez, pero sabemos que ello requiere la formación de un par de fermiones. Muchos físicos pensaban que esto mismo podría suceder en el caso del He-3, por lo que no había que descartar la posibilidad de que fuera un líquido superfluido. En 1973, los estadounidenses David Morris Lee, Douglas Dean Osheroff y Robert Coleman Richardson demostraron que así es. Tuvieron que alcanzar la temperatura de 2,7 mK, lo que no era técnicamente posible hasta entonces. Por este experimento, que era la tesis doctoral de Osheroff, recibieron los tres el premio Nobel de Física de 1996. La descripción teórica detallada de la transición superfluida del He-3 es más complicada de lo que puede sugerir la analogía con la superconductividad. Los pares de elec-

	Helio	Metales	Enanas blancas	Estrellas de neutrones
Constituyentes relevantes	Átomos de He-3	Electrones de conducción	Electrones	Neutrones
Densidades (número por cm^3)	10^{22}	10^{22} – 10^{23}	10^{28} – 10^{29}	10^{39}
Distancias típicas	0,2 - 0,3 nm	0,2 – 0,5 nm	1 pm	1 fm
Energías de interacción	meV 10 K	eV-keV 10^4 – 10^7 K	keV 10^7 K	MeV 10^{10} K
Temperatura cuántica	3 K	10^5 K	10^9 K	10^{11} K

Ejemplos de líquidos de fermiones de espín 1/2. Se han usado los prefijos nano (n = 10^{-9}), pico (p = 10^{-12}), femto (f = 10^{-15}), mili (m = 10^{-3}), kilo (k = 10^3) y mega (M = 10^6). Las energías se han expresado en unidades de electrón-voltio (eV = 1,6 · 10^{-19} julios) y en unidades de temperatura (kelvin), dividiendo los valores anteriores por la constante de Boltzmann k_B = 8,6 · 10^{-5} eV/K.

trones forman un bosón de espín 0, mientras que los pares de átomos de He-3 forman un bosón de espín 1. El sistema es, por tanto, más complicado pero también más rico en nuevas fases y nuevos fenómenos, algo que Landau no llegó a conocer.

La teoría de Landau se aplica a cualquier sistema de fermiones, a condición de no considerar situaciones de superfluidez o superconductividad. Un líquido cuántico es un sistema homogéneo macroscópico de partículas que interaccionan entre sí con una intensidad no despreciable, y que se encuentran a una temperatura suficientemente baja para que los efectos cuánticos sean importantes. Si, de manera estricta, se piensa que un líquido cuántico ha de hallarse en su fase líquida, solo tendríamos el líquido bosónico de He-4 y el líquido fermiónico de He-3. Pero en la práctica, el concepto de líquido cuántico es más amplio, y significa que los efectos cuánticos impiden la solidificación a bajas temperaturas. Esta idea se puede aplicar para explicar el comportamiento de los electrones de conducción en metales y en ciertos semiconductores, de los electrones en el interior de las enanas blancas o de los neutrones en el interior de una estrella de neutrones. El concepto de líquido cuántico permite explicar aspectos cualitativos globales de una gran variedad de sistemas físicos en apariencia muy diferentes, incluso si poseen un número pequeño de constituyentes, como es el caso de los núcleos atómicos, las nanogotas de helio o los agregados metálicos. Todo ello es sin duda parte de la visión global que Landau tenía de la física.

CAPÍTULO 5

Un físico global

La vida de Landau como físico acabó en un accidente que le dejó en coma durante varios meses. Los esfuerzos de los médicos consiguieron lo que parecía imposible: salvarle la vida, y aunque se recuperó, ya nunca más consiguió realizar trabajos en materia científica. Su muerte tuvo lugar seis años más tarde por las secuelas del accidente. Para un buen número de excelentes físicos soviéticos, Landau fue un verdadero maestro, que algunos escriben con mayúsculas.

El domingo 7 de enero de 1962, Landau viajó a Dubna, a unos 150 km al norte de Moscú, en el vehículo de sus amigos Vladimir y Vera Sudakov. La conducción tenía cierto riesgo porque las carreteras estaban cubiertas de hielo. Aún no habían salido de Moscú cuando un peatón atravesó de repente la calzada. Sudakov tuvo que frenar rápidamente y el coche, después de unos trompos, se detuvo en la vía contraria. La fatalidad quiso que en ese momento llegara un camión, que no pudo frenar a tiempo y golpeó el coche, precisamente en la parte en la que estaba Landau. Los Sudakov resultaron ilesos, el vehículo apenas sufrió daños, pero Landau quedó inconsciente, con múltiples fracturas, incluido el cráneo, y daños en órganos internos.

La fama de Landau hizo que la noticia se extendiera rápidamente por Moscú. En el hospital llegaron a reunirse unos veinte médicos de diversas especialidades para evaluar la situación y decidir la manera de proceder. Por la tarde se había congregado en el hospital casi un centenar de científicos, desde ilustres académicos hasta los más jóvenes estudiantes de doctorado, que se ofrecieron voluntarios para ayudar en lo que pudieran, y organizaron equipos de chóferes, recaderos, telefonistas, secretarios, mensajeros... a disposición de los médicos. Kapitsa y Lifshitz informaron del accidente a otros físicos, tanto en la URSS como en el extranjero. Estos contactos permitieron obtener ayuda rápidamen-

te en algunos casos. En un primer momento, el hospital no disponía de cierto medicamento para rebajar la inflamación del cerebro. Sin esperar a saber si otros hospitales podían suministrarlo, Kapitsa movilizó a sus amigos británicos, y al día siguiente llegó por avión un paquete con una única indicación: «Landau. Moscú», que pasó todos los controles sin dificultad. La red de contactos fue muy efectiva cuando los médicos vieron que, a pesar de los antibióticos que se le suministraban, no remitía la infección generalizada. Landau era un adicto a los antibióticos, que tomaba libremente cuando tenía síntomas de resfriado o de gripe, y las cepas usuales de antibióticos no tenían ya ningún efecto sobre su organismo. Fue necesario recurrir a cepas producidas en otros países, y a través de los contactos entre físicos llegaron en varios envíos aéreos desde el Reino Unido, Estados Unidos, Checoslovaquia, Bélgica... En el aeropuerto de Moscú había siempre un físico «de guardia» para recoger el paquete y llevarlo al hospital.

El estado de Landau se agravó a los pocos días del accidente, llegando al paro cardiaco y a la ausencia de funciones cerebrales. Era un caso típico de muerte clínica, pero la rápida y eficaz actuación de los médicos consiguió revertir la situación. Aunque a mediados de febrero todo parecía bajo control, Landau seguía inconsciente. Los neurólogos pensaron en operarle el cerebro, e hicieron venir a especialistas extranjeros para evaluar la situación y preparar la intervención. Finalmente, no fue necesaria porque Landau abrió los ojos a finales de marzo y a principios de abril musitó algunas palabras. Poco a poco empezó una lenta recuperación, que nunca fue completa. A finales de octubre fue trasladado a otro hospital, donde recibía visitas y podía hacer algún tipo de movimiento. El 1 de noviembre recibió un telegrama desde Estocolmo anunciándole la concesión del premio Nobel de Física de ese año.

Landau no estaba en condiciones de viajar y la fundación Nobel dio la autorización para que el premio y la medalla le fueran entregados en Moscú por el embajador de Suecia. El acto tuvo lugar el día 10 de diciembre, haciéndolo coincidir con el momento en que el rey de Suecia entregaba en Estocolmo los demás premios. En Moscú, esta entrega tuvo lugar en el hospital, ante una asistencia muy reducida. Landau quiso dejar la silla de ruedas en

la entrada de la sala y llegar por su propio pie, con grandes esfuerzos, hasta el lugar que le había sido asignado. Incluso pronunció en inglés unas palabras de agradecimiento.

> «Real Academia Ciencias Suecia ha decidido concederle premio Nobel Física por teorías pioneras materia condensada, especialmente helio líquido. Siguen detalles carta. Erik Rudberg, secretario permanente.»
>
> — Telegrama de la Real Academia de las Ciencias de Suecia a Landau.

Dejó el hospital en enero 1964, pero nunca se recuperó completamente. Landau era consciente de que ya había muerto para la física. Apenas podía ayudar a su hijo Igor, quien preparaba los exámenes para ingresar en la universidad. Sus amigos y discípulos le visitaban y le hablaban de las novedades en física. Aunque esto le animaba, no podía concentrarse más de unos minutos. De hecho, hasta su muerte, acaecida el 1 de abril de 1968, vivió unos años de constante padecimiento y dolor.

LA ESCUELA DE LANDAU

Cuando Landau llegó a Járkov se encontró que los jóvenes físicos carecían de la formación adecuada. Se le ocurrió entonces diseñar un programa con los mínimos conocimientos sobre física teórica que, en su exigente opinión, todo físico debería conocer, con independencia de su especialidad. Para Landau la física teórica debía considerarse como un todo, sin compartimentos, con métodos e ideas de aplicabilidad general. Los jóvenes que querían dedicarse a la física teórica con Landau tenían que demostrarle que poseían dichos conocimientos. El mínimo teórico era también una manera particular de razonar y de entender la física, típica de Landau y de sus discípulos. Todas las características de la escuela de Landau se iniciaron y tomaron cuerpo en el período de Járkov, entre 1932 y 1937, pero el protocolo para superar el mínimo se estableció en

Moscú. Cualquiera podía pedir a Landau que le examinara, sin necesidad de acreditar certificados o estudios previos; bastaba con pedir una cita previa. Los párrafos siguientes son parte de la respuesta que Landau dio a la consulta de un estudiante de ingeniería.

> Como ya sabe usted, un teórico debe saber sobre todo matemáticas. Lo que hace falta no son esos teoremas de existencia que tanto gustan a los matemáticos, sino técnicas matemáticas, es decir, la capacidad para resolver problemas matemáticos concretos.
>
> Le recomiendo el siguiente plan de estudio. Primero aprenda diferenciación, integración, solución de ecuaciones diferenciales ordinarias por cuadraturas; estudie análisis vectorial y álgebra tensorial (es decir, cómo operar con índices tensoriales). Aquí el papel principal no corresponde a un libro de texto, sino a un libro que contenga problemas, poco importa qué libro a condición de que tenga muchos problemas.
>
> Una vez haya hecho esto, telefonéeme (es mejor entre las 9:30 y las 10:30, porque casi siempre estoy en casa, pero si es necesario, hágalo a cualquier otra hora del día), y venga a verme. Le examinaré y le proporcionaré un programa para que lo estudie. Si supera todo el programa (le puede llevar entre uno y tres años, según sean sus conocimientos y su diligencia), entonces consideraré que está completamente preparado para el trabajo científico y, si lo desea, intentaré ayudarle con las gestiones necesarias para ello.

Landau proporcionaba un programa esquemático de contenidos, junto con referencias a libros, escritos en ruso, alemán o inglés. Tenía siete apartados que cubrían la física teórica: mecánica clásica, termodinámica y mecánica estadística, mecánica cuántica no relativista, teoría clásica de campos (con relatividad especial y general), mecánica cuántica relativista (con electrodinámica cuántica), electrodinámica de los medios continuos y mecánica de los medios continuos (con hidrodinámica y teoría de la elasticidad). Más tarde añadió un segundo examen de matemáticas que incluía entre otros temas: funciones de variable compleja y transformadas de Laplace. Al principio, Landau examinaba en su propia casa a los candidatos, pero cuando su número aumentó, pidió a sus co-

laboradores más próximos que le ayudaran como examinadores. Sin embargo, el examen inicial de matemáticas era siempre cosa de Landau, quien se hacía así una idea del candidato. Los exámenes consistían en la resolución de varios problemas en un tiempo limitado. El orden en que se hicieran los exámenes de física solo dependía de las preferencias del candidato. En una libreta, Landau anotaba el nombre de cada candidato y las fechas de cada examen (había tres oportunidades para superarlos). Hubo muchos candidatos, pero solo 43 superaron el mínimo.

Pasar el mínimo no significaba ningún certificado, ni título, ni tampoco que Landau sería el director de su tesis. En este sentido, de los 43 nombres de la lista solo 16 pueden ser considerados discípulos directos. Tal como decía Landau en la carta antes mencionada, el mínimo solo daba derecho a su reconocimiento y a su apoyo en su labor científica. Siempre estaba dispuesto a discutir los manuscritos que le presentaban sus discípulos, aportar ideas y hacer sugerencias. Pero solo aceptaba figurar como coautor si consideraba que había participado de manera significativa en la idea inicial y en su desarrollo. De lo contrario, por importantes que hubieran sido su discusión y su crítica para el resultado final del artículo, su nombre solo podía figurar en el apartado de agradecimientos.

Con motivo del 50° aniversario de Landau, sus discípulos y amigos más cercanos decidieron hacer una celebración en el IFP. Como sabían que no apreciaba este tipo de actos, demasiado solemnes para su gusto, se esforzaron en convertirlo en una parodia festiva. En la entrada del IFP un gran cartel advertía: «Deje sus discursos en el guardarropa». Quienes tomaban la palabra ya sabían que no debían usar expresiones como «el gran maestro», «el fundador de la destacada escuela» o «el ilustre físico», sino que tenían que ser originales y sobre todo divertidos. En estas celebraciones se suele hablar de las contribuciones a la física del homenajeado. Sus discípulos quisieron hacerlo también en forma de parodia, y le presentaron dos tablas de mármol en las que se habían grabado los «Diez Mandamientos de Landau», es decir, sus diez contribuciones más importantes a la física. La lista solo contiene trabajos realizados por Landau como único autor o con algunos

de sus discípulos, tal vez como una manera sutil de celebrar la importancia de su escuela.

Aunque, en general, su actitud no era la del gran maestro, con el tiempo fue considerado como tal por muchos de sus discípulos y colegas. En el ambiente de la URSS de aquellos años, se producía inevitablemente un «culto a la personalidad» en torno al líder. Muy a menudo, la frase «Landau dice que...» era considerada por muchos como la respuesta final a cualquier cuestión. Como es de suponer, Landau también se equivocaba y en ocasiones lo hizo en temas que después tuvieron gran trascendencia. Por eso hay quien dice que por culpa de la censura de Landau hubo resultados importantes que fueron publicados por otros, lo que no es exacto. Él

LOS DIEZ MANDAMIENTOS DE LANDAU

En 1958, los discípulos de Landau organizaron una fiesta para celebrar su 50° aniversario. Uno de los regalos fue una parodia de las Tablas de la Ley, en la que recogieron sus aportaciones más importantes a la física. Estos son, según sus discípulos, los Diez Mandamientos de Landau:

1. La matriz densidad en mecánica cuántica.
2. El diamagnetismo de un gas de electrones.
3. Teoría de las transiciones de fase de segundo orden.
4. Dominios ferromagnéticos.
5. Estado intermedio de los superconductores.
6. Teoría estadística de los núcleos.
7. Teoría de la superfluidez del Helio II.
8. Anulación de la carga del electrón.
9. Teoría de los líquidos de Fermi.
10. Principio de paridad combinada.

solo se oponía firmemente a que se publicaran artículos sobre resultados ya conocidos o que solo aportaran algunos retoques a problemas resueltos. Decía que esto era una manifestación de «grafomanía» o «exhibicionismo». En todo lo demás, se limitaba a dar su opinión, y el autor debía decidir si lo publicaba o no. Es cierto que una opinión negativa de Landau frenó muchas iniciativas, a lo que hay que añadir que sus modales durante las discusiones no ayudaban mucho a sostener una opinión contraria.

Ginzburg explicó su propia experiencia al respecto. En las ecuaciones de la teoría de Ginzburg-Landau para la función de ondas efectiva de los electrones superconductores interviene una carga eléctrica efectiva e^*, sobre la que escribieron en el artículo:



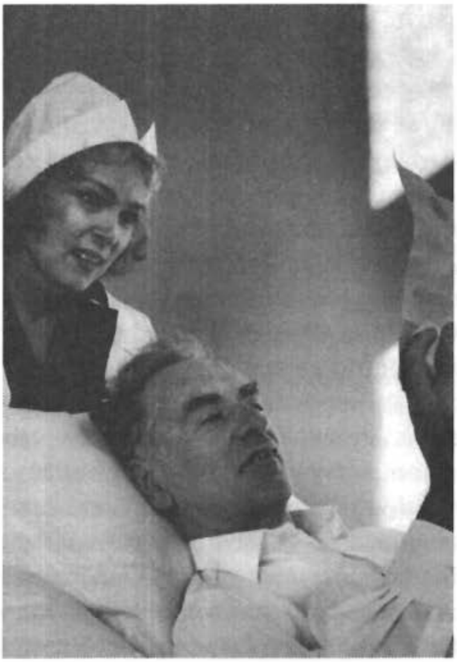
Las dos tablas en las que aparecen inscritos los Diez Mandamientos de Landau.

«No hay razón para pensar que la carga e^* sea diferente de la carga del electrón». Unos años más tarde, Ginzburg se dio cuenta de que se podía obtener un mejor acuerdo con ciertos datos experimentales si la carga efectiva era unas dos o tres veces mayor que la carga del electrón. Lo habló con Landau, pero este no estaba convencido, porque decía que la invariancia de gauge de la teoría se rompería si no fueran iguales. También decía que el valor de e^* debía ser universal, mientras que un valor efectivo podía variar con la presión o la temperatura. Ginzburg publicó su artículo, haciendo referencia a un valor de la carga efectiva que podría mejorar una comparación con datos experimentales, pero sin insistir mucho en ello. Además, añadió un párrafo para indicar la opinión contraria de Landau. Más tarde, la teoría BCS mostró que, debido a la formación de pares de electrones, la carga efectiva debía valer el doble de la carga del electrón, y la invariancia de gauge se seguía manteniendo. Ginzburg lamentó no haber caído en la cuenta del significado de este valor, y no haber sido el primero en hablar de la formación de pares de electrones. Pero siempre dejó muy claro que toda la responsabilidad de no haberlo hecho fue suya, y no de Landau.

EL SEMINARIO DE LANDAU

Los estudiantes de Landau tenían la obligación de participar en los seminarios como parte muy importante para su formación científica. Exceptuando los períodos de su detención y de la guerra, todos los jueves, a las 11 h en punto, tenía lugar el seminario. Durante los primeros años era una reunión en torno a una mesa en la que apenas cabían doce personas. Poco a poco se convirtió en un lugar de encuentro y discusión para muchos físicos teóricos de Moscú. Llegó un momento en que, debido al número de asistentes, el seminario tenía lugar en la sala de conferencias del Instituto. Ginzburg y Migdal fueron dos participantes asiduos y muy activos. Migdal era muy aficionado a gastar bromas, lo que encantaba a Landau, y tenía derecho a un trato especial. Cuando se hacía la hora de empezar, Landau siempre decía: «Esperemos unos minutos a que llegue Migdal».





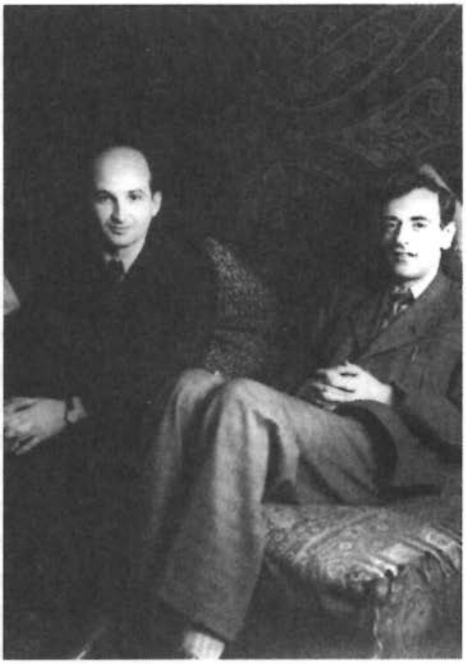


FOTO SUPERIOR:
Celebración del 60° aniversario de Landau (desde la izquierda): Svetlana, esposa de Igor, Landau, su hijo Igor y Cora, la mujer de Lev.

FOTO INFERIOR IZQUIERDA:
Cora y Landau, en una cama de hospital, leyendo el telegrama que le anunciaba la concesión del premio Nobel de Física de 1962.

FOTO INFERIOR DERECHA:
Landau junto a Lifshitz, su discípulo, amigo y coautor del célebre *Curso de Física Teórica*.

Los estudiantes tenían que explicar un artículo escogido por Landau en una revista científica reciente. Daba un vistazo, escogía los que despertaban su interés, y el secretario en funciones del seminario los anotaba en una lista. Por turno, los estudiantes debían presentarlos en las siguientes sesiones. De nada servía alegar ignorancia sobre el tema, pues el aprendizaje consistía precisamente en abordar cualquier problema de interés. Tenían que entender todos los detalles, exponer el artículo de forma comprensible para todos y responder a las preguntas que se hicieran. Landau jugaba en esto un papel determinante, pues no paraba hasta que las ideas fundamentales quedaban claras. Insistía en eliminar la «filología», que es como llamaba a las afirmaciones sin fundamento o de relleno. Algunos artículos eran calificados de «patológicos», su expresión favorita para decir que era conceptualmente erróneo, aunque también lo usaba para calificar de mediocre a un físico. Si los resultados del artículo se consideraban destacables, se inscribía en el «Libro de oro». Si en el curso de la discusión surgían cuestiones que merecían ser estudiadas con mayor detenimiento, se inscribían en el «Libro de problemas». Estos cuadernos se llevaron hasta 1962, y los jóvenes físicos buscaban en ellos temas interesantes para su investigación.

En los seminarios también se presentaban trabajos originales, no solo de los estudiantes de Landau, sino también de otros físicos, jóvenes o veteranos. Pero Landau tenía que decidir primero si el tema era de interés y el tratamiento adecuado. Durante el seminario, los asistentes podían interrumpir la presentación en cualquier momento para pedir aclaraciones o hacer críticas a un punto específico. Los conocimientos casi universales de Landau y sobre todo su profundidad de pensamiento y su espíritu crítico hicieron que muchos físicos, del propio instituto o de otros centros, quisieran presentar en él sus investigaciones. Superar la prueba era una garantía de que se iba por buen camino.

La relación con sus discípulos y colegas era para Landau su fuente de conocimiento más importante. En Járkov, desarrolló un estilo de trabajo muy especial. Las conversaciones y discusiones con discípulos y colegas, y sobre todo las presentaciones de su seminario, lo mantenían al día. De todo ello, Landau sacaba mate-

EVGENY MIJÁILOVICH LIFSHITZ (1915-1985)



Lifshitz nació en Járkov (Ucrania), en cuya Facultad de Física y Mecánica se graduó a los dieciocho años. Al año siguiente, tras superar el mínimo teórico, inició una larga y fructífera colaboración con Landau. Fue una relación muy especial entre maestro y discípulo, que se convirtió en una profunda amistad. Lifshitz es conocido sobre todo por ser coautor del *Curso de Física Teórica*. También escribió la mayoría de artículos de Landau, incluso aquellos en los que era único autor, porque a este le costaba un enorme esfuerzo escribir. Muchos de estos artículos no han quedado anticuados, e incluso podríamos decir que mantienen su frescura inicial, como suele suceder con los clásicos de la literatura, y Lifshitz tiene su parte de mérito. Sin embargo, hay quien se imagina que Lifshitz fue solo el amanuense de Landau, y propaga la broma cruel de que en el *Curso* no hay ni una línea escrita por Landau y ninguna idea original de Lifshitz. Esta afirmación es profundamente injusta con Lifshitz, de quien Landau decía allá donde fuere: «Evgeny es un escritor maravilloso, que solo escribe sobre lo que entiende a fondo». Lifshitz fue siempre el primer crítico de Landau; encontraba los puntos débiles de su razonamiento, buscaba la manera más clara de expresarlo, discutía hasta el más mínimo detalle. Solo entonces redactaba una versión para que fuera revisada por Landau. Gran parte de su actividad científica estuvo relacionada con su maestro, incluyendo su participación en el proyecto termonuclear soviético. Al acabar la guerra, Lifshitz se dedicó sobre todo a investigaciones en cosmología. A partir de 1955 fue editor de la revista científica JETP (*Journal of Experimental and Theoretical Physics*), que convirtió en un referente de calidad.

rial para sus propias reflexiones. Normalmente, una vez conocida la idea básica de un artículo, le resultaba más fácil desarrollarla por sí mismo que seguir con detalle el razonamiento del autor. Pocas veces lo hacía en su despacho, y prefería trabajar en su apartamento, que se encontraba en las instalaciones del IFP. Tumbado en un sofá dedujo por sí mismo muchos de los resultados obtenidos por otros en campos muy diversos de la física teórica.

Según Lifshitz, esto explica que en sus artículos haya tan pocas referencias, incluso a trabajos fundamentales. Su estilo era intentar siempre simplificar las cosas difíciles, y evitar razonamientos complicados, que pretenden aportar una generalidad y un rigor que a menudo son ilusorios. Landau decía de sí mismo que tenía una habilidad especial para «trivializar» las cosas.

Pero Landau era un discutidor nato, como tan bien reflejara en sus versos la poetisa de los tres mosqueteros. Era acalorado, chillón, irónico, se impacientaba ante lo que le parecían banalidades. Tenía un arsenal de expresiones, como basura, absurdo, estupidez, patológico, exhibicionista, palabrería, grafómano, que soltaba sin moderación. Opinaba con toda crudeza y sin ningún miramiento sobre las ideas o resultados en discusión, tratando por igual a un joven estudiante que a un reconocido académico. Aunque no tenía la intención de ofender personalmente a sus interlocutores, era incapaz de entender que estos no lo vieran así. Para Landau eran dos cosas muy distintas decirle idiota a su interlocutor o que todas sus ideas no eran más que idioteces. Solo sus discípulos y colegas más próximos eran capaces de entender y aceptar el matiz; ignoraban las descalificaciones generales (estupidez, basura, imposible...), y prestaban toda su atención a las observaciones concretas sobre su trabajo. También sabían que, al margen de las discusiones científicas, era amable, atento y se preocupaba por los demás.

EL LEGADO CIENTÍFICO DE LANDAU

Además de las muchas aportaciones a la física de Landau, una parte importante de su legado científico es su famoso *Curso de Física Teórica*. Su origen está en el «Programa teórico mínimo para científicos sénior del Instituto Físico-Técnico de Ucrania». En Járkov concibió la idea de escribir una serie de libros asociados a este mínimo. El resultado es algo único, pues no hay otro curso comparable en extensión y excelencia, cuyas «trivializaciones» siguen siendo motivo de reflexión para los físicos. Planificó

diez volúmenes, que escribió en colaboración con Lifshitz. En 1962 solo se habían publicado seis volúmenes, y para muchos físicos soviéticos el curso quedaría incompleto. No era esta la opinión de Lifshitz quien, con la estimable colaboración de Lev Petrovich Pitaevskii escribió los que faltaban (en uno de ellos, con la participación de Vladimir Borisovich Berestetskii), y también corrigió y actualizó los volúmenes publicados.

Durante muchos años, Landau tuvo la costumbre, o más bien deberíamos decir manía, de clasificar a científicos, mujeres, artículos científicos... en una escala de 1 a 5, de mejores a peores. Había mucha curiosidad y morbo por conocer esta clasificación, sobre todo en lo referente a los físicos soviéticos. Landau nunca la hizo pública, excepto por lo que respecta a los físicos teóricos más conocidos que, naturalmente, estaban en la categoría 1, como Bohr, Heisenberg, Schrödinger, Dirac, Fermi o Feynman. Por encima de todos ellos situaba a Einstein, a quien situó en la categoría especial 0,5. En cuanto a sí mismo decía modestamente que estaba en la categoría 2,5. Ginzburg le dijo una vez que, en su opinión y la de muchos otros físicos, Landau podía haber resuelto muchos más problemas si se lo hubiera propuesto. La respuesta de Landau fue inmediata: había hecho todo lo que era capaz de hacer. Ya avanzada la década de 1950 consideró que podía colocarse en la categoría 2. Ciertamente fue el mejor físico de «segunda clase» que haya existido jamás.

Lecturas recomendadas

DINH, PH.M., NAVARRO, J. Y SURAUD, E., *Océans et gouttelettes quantiques*, París, CNRS Éditions, 2007.

DOROZYNSKI, A., *The man they wouldn't let die*, Nueva York, MacMillan, 1967.

GAMOW, G., *Biografía de la física*, Madrid, Alianza Editorial, 2007.

GRIBBIN, J., *Historia de la ciencia, 1543-2001*, Barcelona, Crítica, 2003.

—: *En busca del gato de Schrödinger*, Barcelona, Salvat, 1994.

HARGITTAI, I., *Buried Glory*, Nueva York, Oxford University Press, 2013.

KOJEVNIKOV, A.B., *Stalin's Great Science*, Londres, Imperial College Press, 2004.

KRAGH, H., *Generaciones cuánticas: una historia de la física en el siglo* XX, Madrid, Akal, 2007.

LIVANOVA, A., *Landau. A Great Physicist and Teacher*, Oxford, Pergamon Press, 1980. Traducido del ruso por J.B. Sykes.

MATRICON, J. Y WAYSAND, G., *La guerre du froid. Une histoire de la supraconductivité*, París, Seuil, 1994.

NAVARRO FAUS, J., *Los caminos cuánticos*, Madrid, Nivola, 2007.

ROSENBLUM B. y KUTTNER F., *El enigma cuántico*, Barcelona, Tusquets, 2012.

TOSCANO, F., *Il fisico che visse due volte*, Milán, Sironi, 2008.

Índice